

WESLEY ANDERSEN MEZINE

METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DO ASSOREAMENTO DE  
RESERVATÓRIOS: PROPOSTA PARA A UHE MAUÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Área de Concentração em Geodésia, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion e Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga.

CURITIBA  
2015

---

M617m

Mezine, Wesley Andersen

Metodologia para monitoramento do assoreamento de reservatórios :  
proposta para a UHE Mauá/ Wesley Andersen Mezine. – Curitiba, 2015.  
126 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da  
Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2015.

Orientador: Pedro Luis Faggion – Co-orientador: Luís Augusto Koenig  
Veiga.

Bibliografia: p. 107-113.

1. Assoreamento. 2. Batimetria. 3. Modelo digital do terreno. I.  
Universidade Federal do Paraná. II.Faggion, Pedro Luis. III. Veiga, Luís  
Augusto Koenig . IV. Título.

CDD: 551.305

---

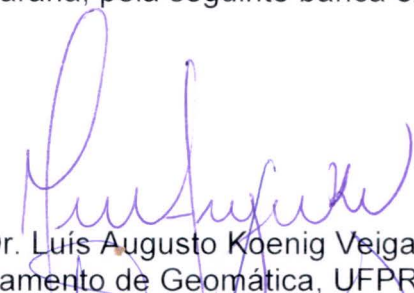
## TERMO DE APROVAÇÃO

WESLEY ANDERSEN MEZINE


“METODOLOGIA PARA O MONITORAMENTO DO ASSOREAMENTO DE  
RESERVATÓRIOS: PROPOSTA PARA A UHE MAUÁ”

Dissertação nº 280 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

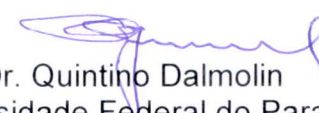
Co-Orientador:



Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga  
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Dante Alves Medeiros Filho  
Universidade Estadual de Maringá, UEM



Prof. Dr. Quintino Dalmolin  
Universidade Federal do Paraná, UFPR

Curitiba, 19 de março de 2015.

*Dedico esse trabalho a minha mãe Neide e a minha querida esposa Larissa.*



## **AGRADECIMENTO**

Principalmente a Deus pelo dom da vida, fé, saúde, inteligência, paciência e pela vontade de vencer.

A minha esposa Larissa pela paciência, amor e força, que está sempre ao meu lado e não me deixa desistir dos meus propósitos.

Aos meus pais Neide e Élio, meu padrasto Joel, minha madrastra Miriam, minhas irmãs Fabielly, Kamilla e meu irmão Élio Jr. que estão sempre me incentivando e acreditam no meu potencial.

À toda minha família.

Aos professores Dr. Pedro L. Faggion e Dr. Luís A. K. Veiga pela orientação, conselhos e apoio em toda elaboração e desenvolvimento do projeto.

Aos colegas da COPEL Lucas Dalsotto, Robson Freire e Flávio E. Sant Ana pelo apoio técnico no desenvolvimento dos levantamentos de campo, e também com sugestões nas etapas de processamento dos dados.

Aos colegas da COPEL, Marcos A. Soares, Dulcineia B. Caetano, Marcos A. Cassias, Monica I. Almeida, Renato M. Tomaz, Lauro G. da Silva e Jucimari Stelmach que contribuíram para realização do trabalho.

Aos professores Dr. Carlos A. Nadal e Dr. Luiz D. D. Ferreira pelas sugestões e ideias para o projeto.

Aos colegas da pós-graduação André, Andrey, Erica, Niarkios, Ruth e Wander.

À COPEL Geração e Transmissão pela aprovação do projeto, liberação de horários para desenvolvimento do projeto e realização dos créditos (disciplinas), além do apoio financeiro e disponibilização de colaboradores, equipamentos, barco e veículo para execução do trabalho.

A ANEEL e a COPEL pelo apoio financeiro no projeto intitulado “Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco”.

A todos os professores e alunos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

A todos aqueles que contribuíram diretamente e indiretamente na realização deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia para a monitoramento do assoreamento de determinada área do reservatório da Usina Hidrelétrica Mauá, situada no rio Tibagi, entre as divisas dos municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba no estado do Paraná, executou-se o levantamento batimétrico à montante da barragem em uma área de 170382,44m<sup>2</sup>. Na coleta de dados, foram realizadas linhas de sondagens regulares, perpendiculares ao curso d'água, para obter a superfície do fundo do lago; e linhas de sondagens de verificações, longitudinais ao fluxo do rio, para calcular as incertezas verticais e o Padrão de Exatidão Cartográfica dos produtos gerados. O volume assoreado foi calculado comparando os dados provenientes do levantamento batimétrico com a superfície de referência obtida pelo recobrimento aéreo feito com a levantamento Laser antes do enchimento do reservatório. A redução das sondagens batimétricas com relação ao nível instantâneo da água do reservatório foi feito por três técnicas distintas de coleta de dados. As diferenças volumétricas dos Modelos Digitais do Terreno, da malha triangular foram calculas no sistema de informações geográficas *ArcGIS*. As análises das diferenças entre as superfícies do fundo foram feitas através processamento digital de imagens utilizando a interpolação dos modelos digitais pelo método da Vizinhança Natural, estrutura de dados matricial. Após a análise das diferenças entre os modelos, constatou-se que elas não representam apenas o volume assoreado do reservatório, mas também diferenças de elevação observadas em locais em que a presença de vegetação arbórea- prejudica a definição real do fundo do lago. A aplicação de diferentes métodos (nível d' água observado por régua linimétrica, nível d' água rastreado com RTK estático e nível d' água coletado com RTK em movimento) de redução das sondagens batimétricas demonstrou que os dois primeiros métodos apresentaram resultados equivalentes, mostrando a viabilidade da aplicação dos mesmos para UHE Mauá. O conjunto de experimentos permitiu o estabelecimento de uma metodologia a ser aplicada na usina.

Palavras-Chave: Monitoramento do Assoreamento, Levantamento Batimétrico e Modelo Digital do Terreno.

## **ABSTRACT**

In order to develop a methodology for the monitoring of silting of a particular area of the Mauá Hydroelectric Power Plant reservoir, located on the Tibagi River, between the currencies of the cities of Ortigueira and Telemaco Borba in the state of Paraná, it was executed the bathymetric survey upstream of the dam in an area of 170382,44m<sup>2</sup>. In data collection were carried out regular surveys lines, perpendicular to the water course, to generate the surface of the lake bottom, and verification survey lines, longitudinal to river flow, to calculate the vertical uncertainties and the Cartographic Accuracy Standard of the products generated. The silted volume was calculated by comparing the descendant data of the bathymetric survey with the reference surface obtained by the aerial flight done with the Laser Scanner technology before filling the reservoir. The reduction of bathymetric surveys with respect to the instantaneous level of the reservoir water it was made by three different techniques of data collection. The volumetric differences of Digital Terrain Models, triangular network were calculated in the geographic information system ArcGIS. The analysis of the differences between the surfaces of the fund were made through digital image processing using the interpolation of digital models by the method of Natural Neighbor in matrix format. After analyzing the differences between the models, it was found that they not only represent the silted volume of the reservoir, but also differences in elevation observed in places in which the presence of arbustive vegetation affect the definition studies of the lake bottom. The application of different methods of reducing bathymetric surveys (water level measured by limnimetric scale, water level tracked with Estatic RTK and water level collected with Moving RTK) showed that the first two methods presented equivalents results, showing the feasibility of application of them for the Maua hydroelectric power plant silting surveying. The experiments allowed the establishment of a methodology to be applied in UHE Maua.

Key words: Monitoring of Sedimentation, Bathymetric Survey and Digital Terrain Model.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - POSIÇÃO DO RESERVATÓRIO NA CASCATA.....	26
FIGURA 2 - ESQUEMA DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS AO LONGO DO RESERVATÓRIO E OS PRINCIPAIS PROBLEMAS CAUSADOS.....	35
FIGURA 3 - SONDAGEM COM FEIXE ESTREIO E LARGO.....	41
FIGURA 4 – SISTEMAS DE REFERÊNCIA E MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO.....	45
FIGURA 5 – RESOLUÇÃO VERTICAL COM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DO IMPULSO.....	49
FIGURA 6 - ECOBATÍMETRO DE DUPLA FREQUÊNCIA.....	50
FIGURA 7 - PROJEÇÃO DO FEIXE SIMPLES NO FUNDO.....	51
FIGURA 8 - CRITÉRIO DO CIRCUNCÍRCULO PARA GERAÇÃO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY.....	61
FIGURA 9 - EXEMPLO DA INTERPOLAÇÃO DE PONTOS PELO MÉTODO DO VIZINHO NATURAL.....	63
FIGURA 10 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.....	65
FIGURA 11 - IMAGEM DA UHE MAUÁ EM 7 DE MARÇO DE 2012 OBTIDA NA COBERTURA AEROFOTOGRAFÉTRICA.....	67
FIGURA 12 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE GOVERNADOR PARIGOT DE SOUZA.....	71
FIGURA 13 - EMBARCAÇÃO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	72
FIGURA 14 - ESTAÇÃO BASE PILAR GEODÉSICO PG-02.....	73
FIGURA 15 - PERFIL GERADO COM OS DADOS BRUTOS DA LINHA REGULAR 13.....	74
FIGURA 16 - PERFIL EDITADO DA LINHA DE SONDAGEM REGULAR 13..	74
FIGURA 17 - RASTREIO GNSS DO NÍVEL D'ÁGUA PELO MÉTODO DE POSICIONAMENTO RTK ESTÁTICO .....	76
FIGURA 18 - DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E O LEVANTAMENTO LASER .....	87

FIGURA 19 - DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER.....	87
FIGURA 20 - DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E O LEVANTAMENTO LASER .....	88
FIGURA 21 - ISOLINHAS DA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER .....	89
FIGURA 22 - AMOSTRAS PARA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DO USO DO SOLO .....	90
FIGURA 23 - MAPA DE USO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO .....	91
FIGURA 24 - SOBREPOSIÇÃO DAS CAMADAS USO DO SOLO E DIFERENÇA ENTRE BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E LEVANTAMENTO LASER .....	92
FIGURA 25 - SOBREPOSIÇÃO DAS CAMADAS USO DO SOLO E DIFERENÇA ENTRE BATIMETRIA/NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E LEVANTAMENTO LASER .....	92
FIGURA 26 - SOBREPOSIÇÃO DAS CAMADAS USO DO SOLO E DIFERENÇA ENTRE BATIMETRIA/NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E LEVANTAMENTO LASER .....	93
FIGURA 27 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME ASSOREADO OBTIDO PELA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E O LEVANTAMENTO LASER.....	94
FIGURA 28 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME ASSOREADO OBTIDO PELA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER .....	95
FIGURA 29 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME ASSOREADO OBTIDO PELA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E O LEVANTAMENTO LASER.....	95
FIGURA 30 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO LASER .....	97
FIGURA 31 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO/NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL .....	97
FIGURA 32 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO .....	98

FIGURA 33 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA .....	98
FIGURA 34 - MAPA DA DIFERENÇA DE DECLIVIDADE ENTRE A BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E O LEVANTAMENTO LASER .	99
FIGURA 35 - MAPA DA DIFERENÇA DE DECLIVIDADE ENTRE A BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER .....	99
FIGURA 36 - MAPA DA DIFERENÇA DE DECLIVIDADE ENTRE A BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E O LEVANTAMENTO LASER .....	100
FIGURA 37 - MODELO 3D DA SOBREPOSIÇÃO DA BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E DO LEVANTAMENTO LASER .....	101
FIGURA 38 - MODELO 3D DA SOBREPOSIÇÃO DA BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E DO LEVANTAMENTO LASER .....	101
FIGURA 39 - MODELO 3D DA SOBREPOSIÇÃO DA BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E DO LEVANTAMENTO LASER.....	102



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- NÍVEL DE CRITICIDADE DE ASSOREMANTO DE RESERVATÓRIOS .....	32
TABELA 2 - VALORES DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS .....	33
TABELA 3 - FREQUÊNCIA DESEJÁVEL PARA LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS DE RESERVATÓRIOS.....	40
TABELA 4 - FREQUÊNCIA DOS ECOBATÍMETROS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE.....	50
TABELA 5 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS UTM DOS PILARES RASTREADAS COM GNSS E LIDAS NAS ORTOFOTOS.....	68
TABELA 6 - COORDENADAS UTM E ALTITUDE ELIPSÓIDICA DOS NÍVEIS D' ÁGUA OBSERVADOS NA MARGEM DIREITA DO RESERVATÓRIO.....	77
TABELA 7 - CLASSIFICAÇÃO DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS - PEC	81
TABELA 8 - AVALIAÇÃO DA IVT E DO PEC – NÍVEL DE REDUÇÃO DAS SONDAgens BATIMÉTRICAS OBTIDOS A PARTIR DO NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL.....	82
TABELA 9 - AVALIAÇÃO DA IVT E DO PEC – NÍVEL DE REDUÇÃO DAS SONDAgens BATIMÉTRICAS OBTIDOS A PARTIR DO NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO .....	83
TABELA 10 - AVALIAÇÃO DA IVT E DO PEC – NÍVEL DE REDUÇÃO DAS SONDAgens BATIMÉTRICAS OBTIDOS A PARTIR DO NÍVEL D'ÁGUA DA RÉGUA .....	83
TABELA 11- TESTE DE HIPÓTESES PARA DUAS MÉDIAS POPULACIONAIS .....	85

## LISTA DE SIGLAS

<b>ALTM</b>	- <i>Airbone Laser Terrain Mapper</i>
<b>ANA</b>	- Agência Nacional de Águas
<b>ANEEL</b>	- Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ASCII</b>	- <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
<b>CHM</b>	- Centro de Hidrografia da Marinha
<b>CMR/ CMR+</b>	- <i>Compact Measurement Record Format</i>
<b>COPEL</b>	- Companhia Paranaense de Energia
<b>CTD</b>	- condutividade, temperatura e profundidade
<b>DDF</b>	- Dupla Diferença de Fase
<b>DGPS</b>	- <i>Differential Global Positioning System</i>
<b>DHN</b>	- Diretoria de Hidrografia e Navegação
<b>ETP</b>	- Erro Total Propagado
<b>FMC</b>	- <i>Forward Motion Control</i>
<b>GNSS</b>	- <i>Global Navigation Satellite System</i>
<b>GSM</b>	- <i>Global System for Mobile Communications</i>
<b>IBGE</b>	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>ICOLD</b>	- <i>International Commission on Large Dams</i>
<b>IHO</b>	- <i>International Hydrographic Organization</i>
<b>IHT</b>	- Incerteza Horizontal Total
<b>IMU</b>	- <i>Inertial Measurement Unit</i>
<b>IVT</b>	- Incerteza Vertical Total
<b>IPH</b>	- Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)
<b>IR</b>	- índice de regularização
<b>MD</b>	- Margem Direita
<b>MDT</b>	- Modelo Digital de Terreno
<b>MI</b>	- Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento
<b>NC</b>	- nível de criticidade
<b>NMEA</b>	- National Marine Electronics Association
<b>OHI</b>	- Organização Internacional de Hidrografia

<b>ONS</b>	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>OTF</b>	- <i>On the fly</i>
<b>OTW</b>	- <i>On the way</i>
<b>PEC</b>	- Padrão de Exatidão Cartográfica
<b>P&amp;D</b>	- Programa de Pesquisa e Desenvolvimento
<b>Prc</b>	- Posição relativa na cascata
<b>Pss</b>	- perda de solo
<b>RBMC</b>	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
<b>RGB</b>	- Red, green e blue
<b>RN</b>	- Referência de Nível
<b>Ror</b>	- Regime de operação do reservatório
<b>RTCM</b>	- <i>Radio Technical Commission for Maritime Service</i>
<b>RTK</b>	- <i>Real Time Kinematic</i>
<b>SIRGAS</b>	- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
<b>SGR</b>	- Sistema Geodésico de Referência
<b>SVP</b>	- Perfilador de Velocidade do Som
<b>TIN</b>	- <i>Triangulated Irregular Network</i>
<b>TTFA</b>	- <i>Time to fix ambiguities</i>
<b>UHE</b>	- Usina Hidrelétrica
<b>UHF</b>	- <i>Ultra High Frequency</i>
<b>UNESCO</b>	- Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
<b>USACE</b>	- <i>United States Army Corps of Engineers</i>
<b>UTM</b>	- <i>Universal Transverse Mercator</i>
<b>VHF</b>	- <i>Very High Frequency</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS .....	22
1.1.1 Objetivo geral .....	22
1.1.2 Objetivos específicos .....	22
1.2 JUSTIFICATIVA .....	23
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>25</b>
2.1 BARRAGENS E RESERVATÓRIOS.....	25
2.2 ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS .....	26
2.2.1 Potencial de assoreamento.....	29
2.2.2 Produção de sedimentos.....	32
2.2.3 Transporte de sedimentos.....	33
2.2.4 Depósito de sedimentos.....	34
2.3 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS .....	36
2.3.1 Levantamentos batimétricos.....	37
2.3.2 Ecobatímetro.....	41
2.3.3 Movimentos da embarcação .....	44
2.3.4 Integração ecobatímetro, GNSS e sistema Inercial.....	46
2.3.4.1 Interface NMEA 0183 .....	47
2.3.5 Velocidade de propagação do som na água .....	47
2.3.6 Princípios geométricos e físicos das ondas acústicas.....	48
2.3.7 Reduções batimétricas.....	51
2.3.8 Teste de latência.....	52
2.3.9 Posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK).....	53
2.3.9.1 Compact Measurement Record.....	54
2.3.10 Processamento e análise dos dados.....	55
2.3.10.1 Fontes de erros .....	56
2.3.10.2 Incerteza Horizontal Total (IHT) .....	56
2.3.10.3 Incerteza Vertical Total (IVT).....	56
2.4 MODELO DIGITAL DO TERRENO .....	58

2.4.1 Triangulação de Delaunay .....	60
2.4.2 Vizinhança natural .....	62
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>64</b>
3.1 LOCAL DE ESTUDO .....	64
3.2 LEVANTAMENTO LASER ASSOCIADO AO LASER SCANNER .....	65
3.3 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO .....	68
3.3.1 Materiais .....	68
3.3.2 Planejamento levantamento batimétrico .....	69
3.3.3 Coleta de dados .....	70
3.3.4 Processamento dos dados .....	73
3.4 MODELO DIGITAL DO TERRENO .....	79
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
4.1 ANÁLISE DA INCERTEZA VERTICAL TOTAL DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO .....	81
4.1.1 Teste de hipóteses da diferença entre duas médias populacionais .....	84
4.2 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS DOS MDTs OBTIDOS PELO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO DA VIZINHANÇA NATURAL .....	85
4.3 AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO .....	94
4.4 RESUMO METODOLOGIA ADOTADA PARA MONITORAMENTO DO ASSOREAMENTO .....	102
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>106</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	106
5.2 RECOMENDAÇÕES .....	108
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento do assoreamento de reservatórios artificiais é necessário, uma vez que a sedimentação reduz a capacidade de armazenamento de água diminuindo sua capacidade, tanto na geração de energia elétrica como no lazer, consumo entre outros. No caso de usinas o assoreamento impacta diretamente na operação e manutenção, sendo que seu monitoramento deve ser realizado ao longo de toda a vida útil da mesma.

Carvalho *et al.* (2003), realizaram estudos do assoreamento de grandes reservatórios, no estudo de caso de Tucuruí verificaram que em uma hipótese mais pessimista, desconsiderando os reservatórios de montante, a soleira da tomada d'água poderia ser alcançada pelo depósito de sedimentos em 78 anos. Segundo Carvalho *et al.* (2000), para a Usina de Itiquira (Mato Grosso) poderá estar assoreado o volume total do reservatório, no nível d'água máximo normal, em 14 anos.

Vilhena; Roig; Meneses (2003) utilizaram técnicas de geoprocessamento para determinar o assoreamento do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Funil. Utilizando bases cartográficas na escala 1: 10.000 de 1965 e na escala 1: 5.000 de 1992. O estudo teve como objetivo a analisar a interpolação e a geração de Modelo Digital de Terreno (MDT) através do método de triangulação de Delaunay. Determinaram a área e o volume em intervalos entre cotas do reservatório, e constataram que o valor absoluto do volume assoreado não deve ser utilizado em função da análise ter sido feita com produtos gerados em diferentes escalas e métodos.

A Agência Nacional de Águas - ANA (ANA, 2013) estabeleceu diretrizes e prazos para atualização das curvas cota x área x volume dos reservatórios artificiais. Na série de dados temporais podem ser utilizadas diferentes técnicas e metodologias de levantamentos para avaliar e quantificar o assoreamento. Normalmente os primeiros levantamentos realizados nas usinas hidrelétricas em operação são realizados antes do enchimento do reservatório, oriundos do recobrimento aerofotogramétrico e da elaboração de bases cartográficas na

escala 1: 5.000 ou 1: 10.000 com curvas de níveis com 5 m de equidistância. Estas representam o relevo original do reservatório apenas das áreas alagadas, ou seja, a altimetria do rio refere-se ao nível d'água para o instante da cobertura aérea. Nas etapas de projeto básico e executivo são levantadas seções topobatimétricas situadas a montante, no eixo e a jusante do barramento para compor uma série temporal de dados para avaliar o assoreamento e também para estudos hidrométricos (ANEEL, 2009). Estas seções são divididas em parte seca, da margem do rio até a cota de inundação, e parte molhada, que corresponde à calha do rio original. A coleta de dados é feita utilizando topografia convencional nas margens e no rio utilizando-se de hastes graduadas, guinchos hidrométricos ou ecobatímetro.

O volume assoreado dos reservatórios é determinado utilizando dados cartográficos oriundos de diferentes épocas, métodos, técnicas e sistemas geodésicos de referência (SGR). Nos reservatórios mais antigos é necessário realizar transformações de coordenadas, de modo a compatibilizar a base de dados em um único Datum. Nos últimos anos a tecnologia trouxe às Ciências Geodésicas um ganho em precisão considerável, modernizando os métodos adotados nos levantamentos e equipamentos. Comparar dados levantados em diferentes épocas com diferentes técnicas é relativamente complexo, em algumas situações as diferenças encontradas entre os produtos utilizados nas análises não representam o assoreamento. As discrepâncias apresentadas por diferentes metodologias e tecnologias afetam diretamente na análise dos resultados.

Neste trabalho buscou-se desenvolver uma metodologia para a avaliação do monitoramento do assoreamento da UHE Mauá. Foram utilizados dois métodos distintos de coleta de dados em campo, uma delas refere-se à elaboração de uma base cartográfica digital e MDT obtidos a partir do recobrimento aerofotogramétrico, utilizando câmera aérea digital e perfilamento a Laser, que para fins de simplificação serão mencionados no decorrer do texto como levantamento Laser. O outro conjunto de dados a ser utilizado na modelagem foi obtido utilizando ecobatímetro monofeixe. Nas duas técnicas as medidas da superfície são feitas de maneira indireta. O levantamento Laser foi executado antes do enchimento do reservatório, no qual grande parte da

vegetação da área de alagado do reservatório no momento de realização do voo já se encontrava suprimida. O levantamento batimétrico foi feito após o enchimento do lago.

As sondagens batimétricas foram reduzidas ao nível instantâneo d'água utilizando-se observações feitas com posicionamento *Real Time Kinematic* (RTK) e também da régua linimétrica telemétrica instalada na barragem. A partir das medições com RTK foram aplicados dois métodos de redução são estes: Nível d'água RTK Móvel (nível d'água medido com o receptor/ antena *rover* instalado no barco) e Nível d'água RTK Estático (nível d'água mensurado com RTK na margem do reservatório). Com os dados dos levantamentos Laser e batimétrico foram elaborados os modelos digitais do terreno e, pela comparação entre os mesmos, foi possível determinar a variação volumétrica de sedimentos na área de estudo do reservatório entre as épocas distintas de coleta de dados.

Aplicando ferramentas de análise espaciais disponíveis no Sistema de Informações Geográficas *ArcGIS 10.1* foram analisados os resultados obtidos com relação a declividade e uso e ocupação do solo. Para avaliar as diferenças em elevação do fundo do reservatório os MDTs foram gerados, pelo método de interpolação da Vizinhaça Natural, estrutura de dados matricial.

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para avaliação do assoreamento de reservatórios utilizando dados provenientes das metodologias levantamento Laser, antes do enchimento, e levantamento batimétrico após o enchimento do reservatório.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia para determinar o assoreamento de reservatórios.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Executar levantamento batimétrico à montante da barragem da UHE Mauá, em um trecho de 300m
- Processar e analisar os dados batimétricos utilizando diferentes metodologias de redução das sondagens batimétricas ao nível instantâneo da água do reservatório, utilizando observações de uma régua linimétrica, e do posicionamento *Global Navigation Satellite System* (GNSS) pelo método *Real Time Kinematic* (RTK)
- Gerar, avaliar e comparar os modelos digitais do terreno obtidos da cobertura aerofotogramétrica realizada em março de 2012, antes do enchimento do reservatório da UHE Mauá, e do levantamento batimétrico realizado em setembro de 2014, após o enchimento do lago
- Calcular e avaliar o volume assoreado do reservatório da UHE Mauá, na área de estudo, no período entre março de 2012 e setembro de 2014

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Uma barragem reduz a velocidade do curso d'água resultando na deposição dos sedimentos transportados pela corrente, causando o assoreamento e consequentemente a redução da capacidade de armazenamento de água do reservatório, podendo em um determinado tempo inviabilizar a geração de energia elétrica (CARVALHO, 2000).

Monitorar e avaliar o assoreamento é fundamental para tomada de decisões. Preocupada com esta situação a Resolução Conjunta Agência Nacional de Águas (ANA)/ Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) N° 03, de 10 de agosto de 2010, tornou obrigatório o monitoramento da sedimentação através da análise quantitativa de série de dados temporais. De acordo com Almeida e Carvalho (1993), a avaliação do assoreamento é importante, pois mais de 90% da matriz energética brasileira é proveniente de fontes hidráulicas. Geralmente os estudos realizados são incompletos e não é dada atenção necessária, pois a influência do assoreamento em grandes reservatórios, maior parte da geração de energia elétrica brasileira, é de longo prazo.

O volume assoreado calculado utilizando séries de dados temporais nem sempre representam de fato a sedimentação. É necessário avaliar os métodos, técnicas, época, escala e compatibilizar os sistemas geodésicos de referência.

Este trabalho propõe uma metodologia para monitoramento do assoreamento do reservatório, os levantamentos de dados foram executados em duas épocas e condições naturais do lago distintas. A primeira foi realizada antes do enchimento do lago. Em determinados locais da área de estudo foram feitas movimentações de materiais em função da construção da Usina, já em outros locais, por exemplo, na margem esquerda original do rio Tibagi o relevo permaneceu inalterado. Após a formação do reservatório realizou-se um novo levantamento com intuito de avaliar as alterações do fundo.

Monitorar espacialmente o assoreamento é fundamental para identificar locais que são necessários retirar sedimentos que possam inviabilizar o

empreendimento. Este trabalho analisa três métodos distintos de redução e propõe uma metodologia para monitorar o assoreamento.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 BARRAGENS E RESERVATÓRIOS

Os reservatórios atuais são formados com múltiplas finalidades, sendo estas: controles de cheias, abastecimento de água, geração de energia elétrica, irrigação, navegação, pesca, lazer e outros. A estrutura da barragem também se torna uma barreira para o transporte de sedimentos. O assoreamento reduz a capacidade de armazenamento de água diminuindo a vida útil (finalidade para o qual foi construído) do reservatório (BRONSVOORT, 2013; MATOS, 2012). Como os reservatórios de acumulação ou de regularização tem a capacidade de controlar a vazão de saída de água, devido a sua característica de controle do nível d'água acumulado, permitindo que em períodos de estiagem se controle a vazão efluente. Os reservatórios operados a fio d'água não possuem a característica de controlar a vazão efluente, operando, desta forma apenas com a vazão do rio, perdendo capacidade de geração em períodos de cheia e operando abaixo da capacidade em períodos de estiagem (FIRJAN, 2014).

As posições dos reservatórios situados na mesma bacia hidrográfica podem ser definidas, um em relação ao outro, conforme a localização na cascata. Se um reservatório "A" está localizado mais próximo a foz do curso d'água principal do que o reservatório "B" ele é dito reservatório de jusante em relação a "B", e o reservatório "B" é de montante em relação ao "A". os reservatórios localizados próximo às nascentes e com pequena bacia incremental são chamados de reservatórios de cabeceira (FIGURA 1).

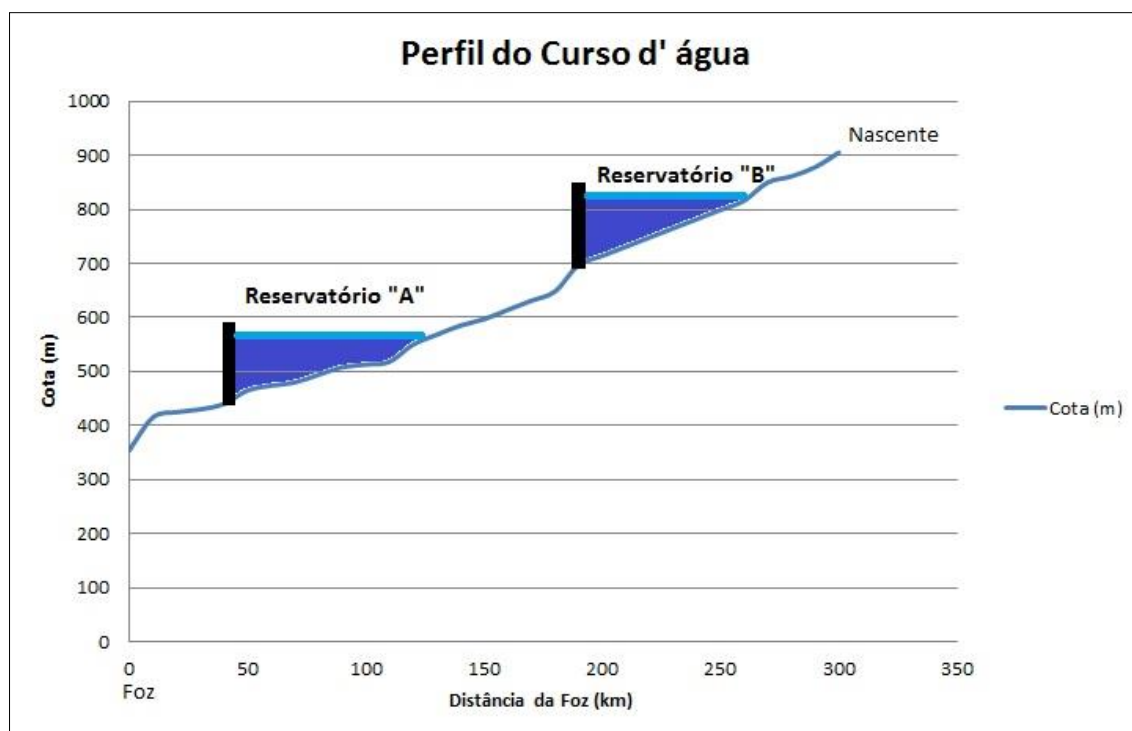


FIGURA 1 - POSIÇÃO DO RESERVATÓRIO NA CASCATA

FONTE: O autor (2014)

## 2.2 ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

A sedimentação compreende a erosão; o deslocamento de partículas até o curso d'água, pelo vento, enxurradas e outros; o transporte de sedimentos; o depósito no leito do rio, lagos naturais e artificiais; e a compactação. Neste trabalho a sedimentação refere-se ao assoreamento de reservatórios, utilizados para fins de geração de energia elétrica. O assoreamento é um depósito de sedimentos permanente ou quase permanente (CARVALHO, 2008).

O assoreamento do reservatório é um processo que ocorre devido à formação de um lago calmo no lugar de um curso d'água que fluía rapidamente. Isso ocorre em função da alteração da morfologia do rio provocando a sedimentação e deposição no leito, ocupando espaço no lago e diminuindo a capacidade do reservatório. Os problemas com a sedimentação dependem das condições locais de cada reservatório. Alguns não terão nenhum impacto, enquanto outros podem diminuir sua capacidade em

aproximadamente 5% por ano. O reservatório de Welbedacht na África do Sul teve uma perda de 90% da sua capacidade total, que corresponde a um prejuízo de cerca de 6 bilhões de dólares por ano (BRONSVOORT, 2013).

Segundo Julien (2010), a taxa de sedimentação de um lago artificial depende dos seguintes fatores:

- Regime do curso d'água;
- Frequências de inundação do lago;
- Operação e geometria do reservatório;
- Potencial de floculação<sup>1</sup>;
- Compactação dos sedimentos;
- Correnteza;
- Uso e ocupação do Solo.

A medição do assoreamento do reservatório tem como objetivo verificar se o depósito de sedimentos não reduzirá a sua vida útil (econômica). Pequenos reservatórios assoreiam mais rápido do que grandes reservatórios, podendo tal fato ocorrer em apenas uma enchente. Em grandes reservatórios como é o caso das usinas hidrelétricas Itaipu, Itá, Sobradinho e Tucuruí o tempo estimado para o assoreamento total do lago pode ser maior do que 1000 anos, porém no remanso<sup>2</sup> em torno de 20 a 30 anos a navegação poderá estar comprometida. Em situações, onde existem afluentes do lago que escoam próximo as estruturas da usina, a geração pode ser prejudicada antes do previsto (CARVALHO *et al.*, 2000).

A Resolução Conjunta ANA/ANEEL N° 03, de 10 de agosto de 2010, no seu artigo 8° torna obrigatória à avaliação do assoreamento de reservatórios, para as usinas despachadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), através da atualização das curvas cota x área x volume. Estas curvas

---

<sup>1</sup> no campo da química, é o processo onde colóides saem de suspensão na forma de agregados, formando partículas maiores, ditos "flocos" ou "flóculos".

<sup>2</sup> No trajeto da água pelo reservatório até a barragem há uma inclinação (remanso) da superfície da água, que varia conforme as vazões aumentam.

são representadas graficamente através das relações cota x área e cota x volume, por exemplo, considerando uma equidistância de 5m para as curvas de níveis tem-se o volume e a área a cada 5m do plano de referência até o fundo do reservatório.

Segundo Carvalho *et al.* (2000), em todas as fases da construção de uma UHE (projeto, implantação, operação e manutenção) devem ser realizadas pesquisas sedimentológicas. Estas compreendem a identificação de locais sujeitos a erosão na bacia, localização de postos sedimentométricos, levantamento de dados hidrológicos e sedimentométricos, processamento dos dados, cálculo do tempo de assoreamento total do reservatório, determinação da vida útil do reservatório através da estimativa do total assoreado até altura da tomada d'água, geração das curvas de cota x área x volume de antes e após o enchimento do reservatório, volume de sedimentos depositado e outros. Nas fases de projeto, inventário, estudo de viabilidade e/ou projeto básico deve ser instalada uma rede sedimentométrica secundária para monitorar pelo menos 80% da área de drenagem da barragem.

O final da vida útil do reservatório ocorre quando os depósitos de sedimentos alcançam a soleira da tomada d'água impossibilitando a operação adequada do empreendimento. O cálculo preliminar do assoreamento é realizado a partir da equação (CARVALHO, 2008):

$$S = \frac{D_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \cdot Q_{st} \cdot E_r}{\gamma_{ap}} \quad (1)$$

$$T = \frac{V_{res}}{S} \quad (2)$$

Onde:

$S$ : volume de sedimento retido no reservatório por ano ( $m^3$ /ano);

$D_{st}$  : deflúvio sólido total médio anual afluente ao reservatório (t/ano);

$E_r$  : eficiência do reservatório em reter o sedimento afluente (decimal);

$\gamma_{ap}$ : peso específico aparente médio dos depósitos ( $t/m^3$ );

$Q_{st}$  : descarga sólida total média afluyente ao reservatório (t/dia);

$T$  : tempo de assoreamento de um determinado volume (anos);

$V_{res}$  : volume total do reservatório ( $m^3$ ).

### 2.2.1 Potencial de assoreamento

De acordo com a ANA (2013), os reservatórios podem ser classificados quanto ao seu potencial de Assoreamento. Esta classificação é baseada nos níveis Baixo (recebe o valor 1 na equação 4), Médio (recebe o valor 2 na equação 4) e Alto (recebe o valor 3 na equação 4) nos seguintes parâmetros: *Potencial de produção de sedimentos*, *Posição relativa na cascata*<sup>3</sup> ( $Prc$ ), *Regime de operação do reservatório*<sup>4</sup> ( $Ror$ ) e *Magnitude e importância dos efeitos do assoreamento* ( $MI$ ).

A classificação apresentada pela ANA (2013), elaborada utilizando como referência ELETROBRAS/IPH (1992), para o potencial de produção de sedimentos baseada na perda de solo é a seguinte:

- Se a Perda de Solo ( $Pss$ )<sup>5</sup> for menor do que 25 t/( $km^2$ .ano), caracteriza baixo potencial a produção de sedimentos (1);
- Quando o  $Pss$  estiver no intervalo entre 25 e 100 t/( $km^2$ .ano) configura-se médio potencial (2);
- Se o valor do  $Pss$  é superior a 100 t/( $km^2$ .ano) tem-se alto potencial de produção de sedimentos (3).

A posição do reservatório na bacia hidrográfica e o potencial de produção de sedimentos determinam a suscetibilidade ao assoreamento. A baixa suscetibilidade (1) ocorre quando o reservatório de jusante tem uma pequena bacia incremental<sup>6</sup>. A média (2) está vinculada a reservatórios de

<sup>3</sup> Posição do reservatório em relação a nascente e a foz do curso d'água principal.

<sup>4</sup> É a forma como o reservatório é operado, por regularização ou a fio d' água.

<sup>5</sup> Terminologia adotada por ELETROBRAS/IPH (1992).

<sup>6</sup> A diferença entre a área de drenagem de uma usina de jusante em relação à usina de montante.



jusante com grande bacia incremental. Os reservatórios de cabeceira apresentam alta suscetibilidade (3) ao assoreamento (ANA, 2013).

Os reservatórios de regularização perdem capacidade devido ao assoreamento, enquanto estes operados a fio d'água, apresentam problemas com o assoreamento na elevação dos níveis da água do remanso a montante. O cálculo da suscetibilidade a erosão é dado pela equação:

$$IR = \frac{\text{Volume Útil}}{\text{Vazão Turbinada Média}^7} \quad (3)$$

Se o índice de regularização (*IR*) for inferior a 30 dias implica em baixa suscetibilidade (1) ao assoreamento. Caso o *IR* esteja entre 30 e 150 corresponde à média (2), e se superior a 150 dias, alta suscetibilidade (3) (ANA, 2013).

O parâmetro Magnitude e Importância dos Efeitos do Assoreamento é aplicado em reservatórios que não apresentaram alta suscetibilidade a erosão em nenhum dos coeficientes anteriores. As seguintes classificações são adotadas neste caso (ANA, 2013):

- Se o reservatório tem alta suscetibilidade ao assoreamento em pelo menos um dos parâmetros anteriores, possuem hidrovias ou no mínimo 3 municípios com mais de 50 mil habitantes localizados na margem do rio principal implica em alta externalidade<sup>8</sup> (3);
- Se o reservatório não tem alta suscetibilidade ao assoreamento em nenhum dos parâmetros anteriores, porém possui ao menos uma classificação como média suscetibilidade ou no mínimo 2 municípios com mais de 50 mil habitantes localizados na margem do rio principal implica em média externalidade (2);

---

<sup>7</sup> Vazão média que passa através das turbinas de uma usina hidrelétrica, utilizada para fins de geração de energia

<sup>8</sup> Existe externalidade quando há consequências a terceiros.

- Demais situações implicam em baixa externalidade (1).

Conforme classificações adotadas pela ANA (2013), maior atenção ao assoreamento é dado em reservatórios que são utilizados para o transporte de mercadorias e que possuem municípios em suas margens com população superior a 50 mil habitantes, ou seja, um reservatório que tem mais infraestruturas e atividades econômicas relacionadas a ele, de forma direta, sofrerá maiores impactos do que outro que tem menos.

O nível de criticidade (NC) do assoreamento é dado pela equação (ANA, 2013):

$$NC = \frac{Pss + Prc + MI + 4 Ror}{21} \quad (4)$$

Onde:

*Pss*: perda de solo;

*Prc*: posição relativa na cascata;

*MI*: magnitude e importância dos efeitos do assoreamento;

*Ror*: regime de operação do empreendimento.

Na (TABELA 1) são apresentadas as classes de acordo com o nível de criticidade. O valor do NC é utilizado para definir a quantidade e a localização de seções de controle para o monitoramento do assoreamento

TABELA 1- NÍVEL DE CRITICIDADE DE ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

CLASSE	NÍVEL DE CRITICIDADE		DESCRIÇÃO
1	Alto	$NC \geq 0,75$	Reservatório que apresenta risco de assoreamento e os efeitos dele é prejudicial a geração de energia elétrica
2	Médio	$0,50 \leq NC < 0,75$	Reservatório que existem riscos menores de assoreamento ou onde os efeitos esperados não são significativos
3	Baixo	$0,50 < NC$	Reservatório localizado em bacia hidrográfica com pouca produção de sedimentos, o risco de assoreamento é muito baixo

FONTE: ANA(2013).

### 2.2.2 Produção de sedimentos

A erosão consiste na extração de partículas da rocha e do solo, ocasionadas pelo atrito com a água, o vento e outros fenômenos. A sedimentação fluvial ocorre quando o transporte se dá através de cursos d'água ou eólica quando o deslocamento é realizado pelo vento. O traslado das partículas devido à erosão depende da forma, tamanho, peso e das forças aplicadas sobre ela. A chuva causa o colapso no solo e a enxurrada desloca os sedimentos até o curso d'água, e são os maiores responsáveis pelo transporte de sedimentos (CARVALHO, 2000).

Segundo ICOLD<sup>9</sup> (1989) *apud* Carvalho *et al.* (2000), a produção de sedimentos na bacia hidrográfica é influenciada pelas seguintes condicionantes: precipitação, tipo de solo, cobertura vegetal, uso e ocupação do solo, escoamento superficial, características dos sedimentos, topografia, natureza da rede de drenagem e hidráulica dos canais. Na (TABELA 2) são apresentados os valores de produção de sedimentos aceitáveis.

<sup>9</sup> ICOLD, International Commission on Large Dams. **Sedimentation control of reservoirs.** Guidelines. Bulletin 67. Paris. 1989.

TABELA 2 - VALORES DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

TOLERÂNCIA	PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	
	ton/ (mi <sup>2</sup> .ano)	t/ (km <sup>2</sup> .ano)
Alta	> 500	175
Moderada	200 a 500	70 a 175
Baixa	< 100	35

FONTE: Adaptado CARVALHO *et al.* (2000)

### 2.2.3 Transporte de sedimentos

Os sedimentos são transportados em suspensão, rolando ou deslizando sobre a camada de fundo e intercalando por suspensão e acúmulo no fundo (TWENHOFEL, 1939). O movimento natural das partículas está relacionado à velocidade e turbulência da água e depende dos seguintes fatores: dimensões, forma e peso específico da partícula. Outra subdivisão considera as dimensões da partícula, são os deslocamentos por lavagem e sobre a camada do fundo. Os maiores problemas no transporte de sedimentos estão vinculados aos sedimentos finos carregados em suspensão (GARCÍA, 2008; VANONI, 2006).

A capacidade de transporte em suspensão aumenta quando as partículas são irregulares, e diminui se elas forem de formato esférico. A capacidade do transporte por tração (deslizando ou rolando) aumenta se as formas dos sedimentos se assemelham a esferas e elipsoides (TWENHOFEL, 1939).

De acordo com Cabral (2005), os principais elementos que colaboram para o transporte de sedimento são: chuva, solo, formação geológica, cobertura do solo, uso e ocupação do solo, relevo, erosão, escoamento na superfície, tipos de sedimentos e condições morfológicas do curso d'água. O transporte e a velocidade da sedimentação são diferentes para cada reservatório e dependem da vazão, das características morfométricas e da localização do lago na bacia hidrográfica.

Segundo *Subcommittee on Sedimentation* (1963)<sup>10</sup> apud Carvalho (2000), o transporte de sedimentos pode ser definido em:

- Carga sólida de arrasto: as partículas de sedimento rolam ou deslizam sobre o leito (em contato), longitudinalmente ao curso d'água;
- Carga sólida saltante: as partículas saltam no curso d'água, influenciadas pela correnteza ou impulsionadas pelo impacto com outros sedimentos;
- Carga sólida em suspensão: as partículas deslocam-se horizontalmente enquanto são sustentadas verticalmente pela velocidade da corrente.

#### 2.2.4 Depósito de sedimentos

Para Carvalho *et al.* (2000), Cabral (2005), Julien (2010), o curso d'água que escoar do afluente para o reservatório sofre uma redução na velocidade da corrente e tem um aumento da área das suas seções transversais proporcionando a sedimentação e deposição da carga em suspensão. Os sedimentos mais densos, partículas sólidas como areia e pedregulhos, são depositados inicialmente no final do remanso enquanto os mais leves escoam pelo reservatório.

Inicialmente as partículas com maior diâmetro, seixos e areia grossa são depositados no leito do canal. Na sequência ocorre o depósito da areia fina e do silte grosso. Partículas menores com silte fino e argila percorrem o lago em suspensão. O barramento age como um obstáculo, impedindo que uma grande quantidade de sedimentos passe para jusante (SILVA, 2007).

O aumento do assoreamento provoca a redução da capacidade de armazenamento de água do reservatório, a ampliação do remanso à montante

---

<sup>10</sup> SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION (1963). **Measurement of the sediment discharge of streams**, Report 8 - Inter-Agency Committee on Water Resources - Iowa City, Iowa.

e a retenção de partículas torna-se ineficaz, uma vez que estas são transportadas para jusante do barramento. O depósito de sedimentos na área alagada não é uniforme, se o local for a montante é denominado depósito do remanso (*backwater deposit*), no interior do reservatório é conhecido com delta, nas margens do reservatório como depósito de margem (*overbank*) e no leito do lago como depósito de leito (*bottom-set deposit*). Quando ocorrem enchentes existem os depósitos de várzea e de planície de inundação. Na (FIGURA 2) é apresentada uma representação esquemática da formação de depósitos de sedimentos ao longo do reservatório e os principais problemas por eles causados (CARVALHO, 2008).

O volume de material assoreado está diretamente relacionado ao aumento da erosão na área de drenagem do reservatório (CARVALHO *et al.*, 2000).

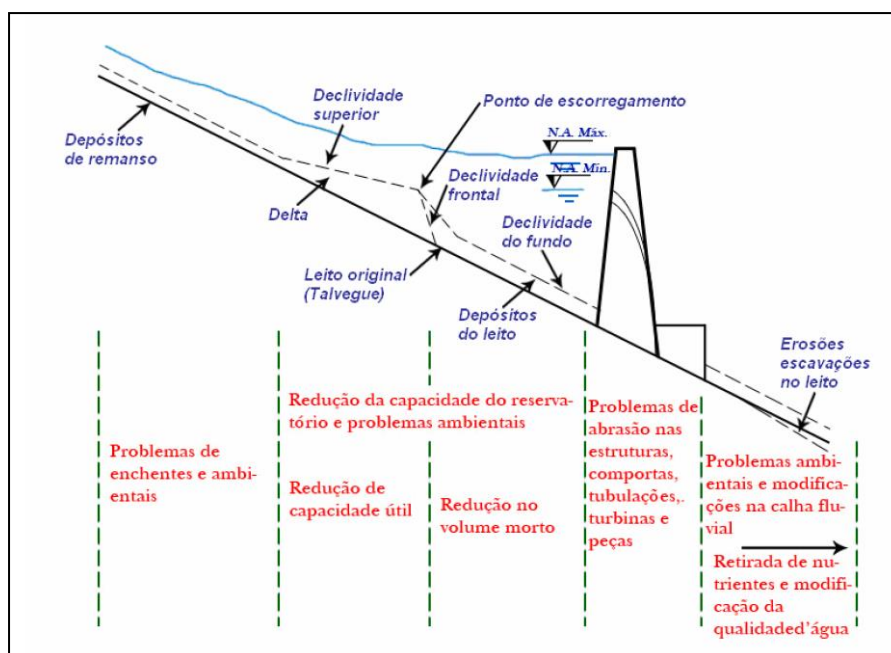


FIGURA 2 - ESQUEMA DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS AO LONGO DO RESERVATÓRIO E OS PRINCIPAIS PROBLEMAS CAUSADOS

FONTE: Teixeira *et al.* (2007)<sup>11</sup> adaptado de Carvalho (2008)

<sup>11</sup> TEIXEIRA, F. J. *et al.* **Estudo do assoreamento no reservatório de Barra Bonita/SP utilizando comparação batimétrica.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.

## 2.3 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

O levantamento hidrográfico é realizado com objetivo de elaborar mapas para subsidiar à navegação de embarcações, sendo este realizado em áreas navegáveis marítimas, fluviais, lacustres em canais naturais ou artificiais. Cabe a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) em águas sob jurisdição brasileira, coordenar e elaborar o Plano Cartográfico Náutico Brasileiro, as Normas de Autoridade Marítima e a edição de cartas e publicações náuticas. Os trabalhos e normas desenvolvidos pela DHN estão vinculados a IHO (*International Hydrographic Organization*). O Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) é responsável pela autorização, controle, análise de dados, produção e atualização de cartas e publicações náuticas de levantamentos hidrográficos executados por órgãos e/ou entidades extra Marinha, exceto quando realizados diretamente por órgãos públicos da Administração Federal, autarquias e entidades paraestatais, federais (MARINHA DO BRASIL, 2011).

De acordo com a MARINHA DO BRASIL (2011), os levantamentos hidrográficos podem ser classificados conforme a sua finalidade:

- Categoria A: os dados coletados podem ser utilizados na atualização e elaboração de cartas náuticas;
- Categoria B: o levantamento não tem como finalidade a atualização de cartas náuticas;

As empresas e profissionais executores de levantamentos hidrográficos deverão estar cadastrados no CHM, e quando for realizar tais levantamentos estes submeterão um relatório discriminando de forma detalhada as atividades que serão realizadas na área de interesse. Com base no relatório será definida a classe que se enquadra o levantamento hidrográfico. A coleta de dados deverá ser executada conforme diretrizes estabelecidas na NORMAM-25/DHN e demais documentos pertinentes.

A OHI (2008), através da publicação S-44 (5ª edição) estabeleceu uma classificação para os levantamentos hidrográficos considerando o propósito e a precisão, são estas:

- Ordem Especial: áreas de ancoragem, portos e canais onde lazeira<sup>12</sup> de água abaixo da quilha é crítica. Geralmente a profundidade é inferior a 40 m. Deve ser realizado o levantamento completo do solo marítimo e os tamanhos das feições a serem identificadas são estritamente pequenos.
- Ordem 1a: áreas de mar muito raso, onde as feições naturais e artificiais do leito marítimo podem interferir na navegação, entretanto a lazeira de água sob a quilha é maior que na Ordem Especial. Deve ser realizado o levantamento completo do solo marítimo e o tamanho das feições a serem identificadas é maior, para profundidades superiores a 40m. A profundidade máxima para esta Ordem é de 100m.
- Ordem 1b: áreas com profundidades superiores a 100m e que a lazeira da água abaixo da quilha não é de grande importância. O levantamento completo do solo marítimo não é necessário, e consequentemente determinadas feições não precisam ser levantadas.
- Ordem 2: aplicada em áreas com profundidades superiores a 100m, onde uma descrição geral do leito seja o suficiente. Não é necessário um levantamento completo do solo marítimo.

### 2.3.1 Levantamentos batimétricos

O levantamento batimétrico é a atividade principal de um levantamento hidrográfico e tem como objetivo determinar a profundidade do fundo submarino, rios, córregos, lagos artificiais e naturais, atrelando a sua respectiva posição espacial. Na coleta de dados são utilizados geralmente ecobatímetros e sonares de varredura lateral. Os levantamentos com sondadores acústicos selecionados adequadamente permitem a observação de profundidades superiores às permitidas por sensoriamento remoto.

---

<sup>12</sup> Espaço para manobra de navio.



Conhecidas as profundidades e suas respectivas posições pode ser elaborado um mapa com as curvas isobatas (mesma profundidade) que representa o relevo submerso. A escala de representação depende do propósito do trabalho. O projeto de um gasoduto pode ser representado na escala 1: 2500, enquanto estudos relacionados a transporte podem ser produzidos em escalas menores 1: 100.000, por exemplo. Diferentes métodos de observações são aplicados conforme a escala de interesse (SÁNCHEZ, 2014).

Os levantamentos batimétricos são executados também com a finalidade de obter o volume de reservatórios de águas artificiais. Através de séries temporais de dados é possível obter o volume assoreado, a partir da comparação de MDTs. A coleta de dados envolve as seguintes etapas: planejamento do recobrimento batimétrico, levantamento de campo, processamento dos dados e elaboração de mapas digitais, geração de curvas cota área e cota volume, e MDT (KUWAJIMA, 2012).

Ribeiro; Centeno; Krueger (2008) estimaram profundidades aplicando redes neurais artificiais e utilizando dados batimétricos e imagens do satélite IKONOS II. Os resultados obtidos se enquadram nas recomendações da *International Hydrographic Organization* (IHO), para profundidades entre 80 cm e 3 m, pois o erro máximo cometido foi de 50 cm

As especificações para levantamentos batimétricos da Marinha e da IHO são direcionados a coleta de dados em ambiente marinho. No Brasil a Agência Nacional das Águas publicou em dezembro de 2013 uma nova versão para o documento “Orientações para atualização das curvas cota x área x volume”. Este trabalho estabelece diretrizes para realização de levantamentos batimétricos em reservatórios de água artificiais, sendo adequado para batimetria em rios, e lagos naturais e artificiais.

Julien (2010) cita que os métodos clássicos para medição da sedimentação em reservatórios cheios são realizados utilizando sondas acústicas no lago. Nas margens do reservatório, são executados levantamentos aerofotogramétricos ou topográficos.

Antes de iniciar a coleta de dados com sondadores acústicos deve-se realizar a calibração do ecobatímetro utilizando placa de aferição ou perfilador de velocidade (ANA, 2013). Estes equipamentos têm como objetivo verificar se o equipamento está configurado de maneira adequada, quanto à velocidade de propagação do som na água, no caso do perfilador de velocidade, e se está medindo a profundidade real do fundo, através da conferência com a placa de aferição que é imersa no curso d'água. A conferência da profundidade é realizada descendo a placa gradativamente até o fundo, para se obter o valor da velocidade de propagação do som ao longo da coluna d'água.

De acordo com a UNESCO<sup>13</sup> (1982) e Yukian<sup>14</sup> (1989) *apud* CARVALHO *et al.* (2000), os levantamentos batimétricos são executados em determinados trechos ou em todo o reservatório, com a finalidade de estudar a erosão e a deposição na área de interesse, a depleção<sup>15</sup> da capacidade do reservatório e os processos fluviais sujeitos ao remanso do reservatório.

Segundo Carvalho *et al.*, (2000), os levantamentos batimétricos são utilizados na medição indireta da descarga sólida de arrasto<sup>16</sup>, através da medida de volume da duna que se desloca. A descarga sólida total pode ser determinada diretamente, a partir do levantamento batimétrico do reservatório, possibilitando a determinação do volume de sedimentos total do lago.

Os levantamentos batimétricos devem ser realizados a cada 2 anos em pequenos reservatórios, 5 anos em médios e 10 anos em grandes reservatórios (TABELA 3), com intuito de obter as curvas cota x área x volume e determinar o assoreamento. Caso a quantidade assoreada entre dois levantamentos, em sequencia, não seja significativa o intervalo de tempo poderá ser ampliado. Na (TABELA 3) é apresentada a classificação (não é rígida, pode ter diferentes conceitos em outros países), e a frequência da coleta de dados (CARVALHO, 2008).

---

<sup>13</sup> UNESCO. **Sedimentation problems in river basins**. Paris, 1982.

<sup>14</sup> YUQIAN, Long. **Manual on operational methods for the measurement of sediment transport**. WMO, World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland, 1989.

<sup>15</sup> Diferença de nível da água do reservatório entre o nível mínimo e máximo operacional.

<sup>16</sup> É todo sedimento transportado junto ao leito do rio.

TABELA 3 - FREQUÊNCIA DESEJÁVEL PARA LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS DE RESERVATÓRIOS

PORTE DO RESERVATÓRIO	VOLUME ( $10^6 \text{ m}^3$ )	INTERVALO ENTRE LEVANTAMENTOS
Pequeno	< 10	2 anos
Médio	10 a 100	5 anos
Grande	> 100	10 anos

FONTE: adaptada de Carvalho *et al.* (2000)

Os principais objetivos de um levantamento batimétrico, com intuito de avaliar o assoreamento são (CARVALHO *et al.*, 2000):

- Determinação do volume de água do reservatório na época do levantamento;
- Determinação da área do espelho d'água na época do levantamento;
- Obtenção das curvas cota x área x volume para época do levantamento;
- Determinação da geometria do leito;
- Análise dos sedimentos acumulados;
- Monitoramento temporal do sedimento assoreado, através da comparação de levantamentos realizados em épocas distintas;
- Cálculo da capacidade de retenção de sedimentos;
- Outros.

A ANA (2013) recomenda que seja instalada na área de execução do levantamento batimétrico pelo menos uma seção de réguas linimétricas<sup>17</sup>, e no mínimo uma Referência de Nível (RN) vinculada a esta seção. A quantidade de réguas depende da declividade do espelho d'água do lago. Como alternativa para redução das quantidades de seções de réguas linimétricas podem ser utilizadas as coordenadas altimétricas obtidas pelo *Real Time Kinematic* (RTK) instalado no barco em movimento.

<sup>17</sup> Escala graduada, de madeira ou metal, ou pintada sobre uma parede (superfície vertical).

### 2.3.2 Ecobatímetro

Os ecobatímetros podem ser classificados pela frequência em feixe simples (um transdutor) e multifeixe (um projetor e um hidrofone). A sonda de feixe simples requer o conhecimento dos ângulos *roll* e *pitch*, descritos a seguir. A largura do feixe depende do tamanho do transdutor e do comprimento da onda acústica. Maior frequência ou maior transdutor está relacionada a menor feixe. Feixes mais estreitos 2° (graus) a 5° (graus) são aplicados quando se deseja alta precisão. Na (FIGURA 3) são ilustrados os resultados obtidos com feixe estreito e largo (OHI, 2005).

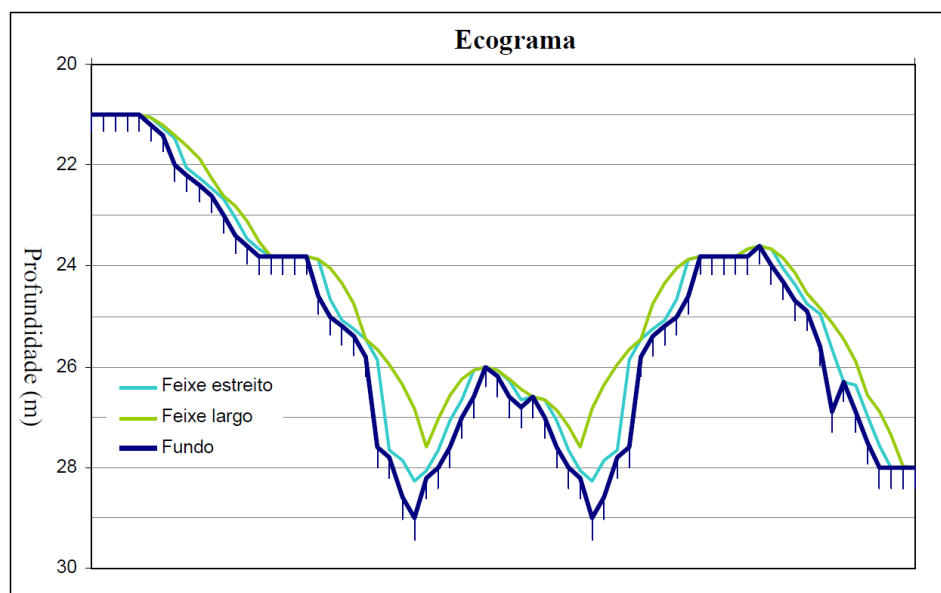


FIGURA 3 - SONDAGEM COM FEIXE ESTREITO E LARGO

FONTE: OHI (2005)

Na (FIGURA 3) observa-se que o feixe acústico estreito atinge maiores profundidades que o feixe largo. Aqueles descrevem o fundo de lagos, reservatórios, rios e mares com maior qualidade

A medição da profundidade pode ser realizada por métodos diretos, guinchos hidrométricos, réguas, fio de prumo e outros, e também por métodos indiretos, utilizando ecobatímetro de feixe simples e multifeixe, sonar de varredura a Laser entre outros. Segundo Ribeiro; Centeno; Krueger (2008) e

Tedesco (2003), as observações realizadas por um ecobatímetro consistem em emitir um feixe de ondas sonoras ou ultrassônicas, orientadas verticalmente ao transdutor (emissor), percorrendo o meio líquido até atingir o fundo submarino, do rio ou do lago, este é refletido e retorna a superfície sendo detectado pelo transdutor (receptor). O percurso de ida e volta do sinal é transformado em profundidade pela equação:

$$p = \frac{1}{2} v \cdot t \quad (5)$$

Onde:

$p$ : profundidade;

$v$ : velocidade de propagação do som na água;

$t$ : tempo de ida e volta do sinal, do transmissor para o fundo e deste para o receptor.

Um componente importante do ecobatímetro é o transdutor, que é responsável pela emissão e recepção do sinal acústico. Nele os impulsos elétricos são transformados em impulsos acústicos. O impulso interage com o fundo submarino ou leito do rio resultando em reflexão, transmissão e espalhamento do eco. Os transdutores são classificados em função do modo de operação, feixe, largura do feixe e modo de instalação. O transdutor pode ser instalado no casco, rebocado ou portátil (instalado em uma haste acoplada na lateral do barco) (OHI, 2005).

O ecobatímetro monofeixe é composto pelos seguintes elementos (Felix<sup>18</sup>, 1996 apud, Ferreira, 2013): gerador de pulso, gerador de alta tensão, transdutor, amplificador e registrador. As profundidades podem ser registradas de forma digital, com a utilização de um computador portátil, ou graficamente para equipamentos que apresentam registro analógico. A intensidade do eco

---

<sup>18</sup> FELIX, L. A. **Algumas considerações sobre levantamento hidrográfico em grande escala**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996.

diminui com o tempo tornando-se necessário o ajuste automático do *ganho*, que é a amplificação do sinal elétrico gerado na recepção do sinal acústico no transdutor. A energia é emitida, orientada verticalmente, a energia refletida (eco) retorna, e a distância da sonda até o fundo (profundidade observada) é calculada através do intervalo de tempo e da velocidade do som na água. A seguir são apresentados os principais parâmetros aplicados nos ecobatímetros (OHI, 2005):

- Potência: deverá ser o mínimo necessário para garantir a detecção do fundo, uma vez que altas potências causam reverberação e cavitação (bolhas de ar na água), e com consequência o registro inadequado das observações;
- Ganho: a amplificação do sinal também aumenta o ruído, gerando dados incoerentes, deve ser aplicado em função do tipo de fundo;
- Comprimento do impulso: é responsável pela resolução vertical do ecobatímetro, geralmente ele é corrigido automaticamente e quanto menor o impulso maior é a precisão;
- Calado: corresponde a imersão da sonda (m) tendo como referência o nível instantâneo da água;
- Velocidade de propagação do som na água: velocidade média do som na área de levantamento.

A equação a seguir representa a capacidade e o desempenho do ecobatímetro na detecção de sinais (OHI, 2005):

$$EE = SL - 2TL - (NL - DI) + BS - DT \quad (6)$$

Onde:

*EE*: medida da detecção do sinal (*Echo Excess*);

*SL*: nível de transmissão (*source level*);

*TL*: perdas de transmissão (*transmission loss*);

*NL*: nível de ruído (*noise level*);

*DI*: índice de directividade (*directivity index*);

*BS*: nível de retrodifusão (*backscatter strength*);

*DT*: limiar de detecção (*detection threshold*).

A operação e registro de dados do ecobatímetro são realizados considerando os seguintes critérios: preliminarmente deve ser feita a calibração da velocidade de propagação do som na água, ajustar a escala geral para profundidade estimada, ajuste da frequência em função da profundidade e para sondadores com registro de dados analógicos deve-se definir o *ganho* e a *intensidade do registro* no papel (OHI, 2005).

### 2.3.3 Movimentos da embarcação

As medidas de profundidades são realizadas com a embarcação em movimento, e devem estar vinculadas a um sistema de referência único. A origem deste sistema não necessariamente deve coincidir com o centro de massa da plataforma (NARDEZ, 2010). Em levantamentos batimétricos e topobatimétricos realizados em reservatórios artificiais e rios para estudos de vazão e assoreamento, o sistema de coordenadas da embarcação coincide com a posição do transdutor e do receptor GNSS, instalados na mesma linha de referência (vertical), e geralmente posicionados na lateral da embarcação.

Para calcular as profundidades reduzidas é necessário corrigir os movimentos de translação e rotação que afetam o movimento uniforme da embarcação. O sistema de coordenadas tridimensionais ortogonais da plataforma tem origem no centro de massa da embarcação e é definido pela regra da mão direita. A (FIGURA 4) ilustra a orientação dos eixos X, Y e Z e suas respectivas translações e rotações. As translações são (OHI, 2005):

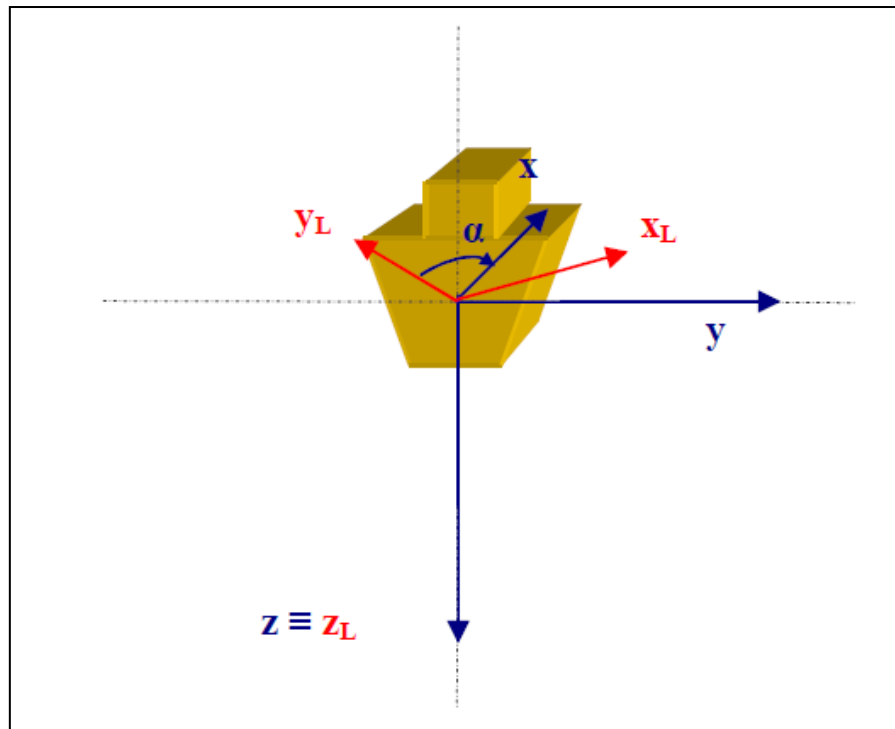


FIGURA 4 – SISTEMAS DE REFERÊNCIA E MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO

FONTE: OHI (2005)

- No eixo X, é denominada *Surge* e é positiva no sentido da navegação;
- No eixo Y, é denominada *Sway* e é positivo à direita do sentido de navegação;
- No eixo Z, é denominado *Heave* e é positivo para baixo;

As rotações sobre os eixos X, Y e Z são (OHI, 2005):

- Em torno do eixo X, em direção à proa, é chamado de balanço (*roll*) e é positivo quando o estibordo imerge na água.
- A rotação em torno do eixo Y, em direção ao estibordo, é chamada de cabeceio (*pitch*) e é positivo quando a proa emerge da água;
- A rotação em torno do eixo Z, orientado para baixo, é chamada de guinada (*yaw*) e é positivo para rotações no sentido horário.



As equações para transformação do sistema de coordenadas ortogonal de embarcação para o sistema local ortogonal tridimensional podem ser encontradas em OHI (2005).

Segundo Krueger (1999), o movimento da embarcação está vinculado a um sistema de coordenadas tridimensionais local, sendo a origem do sistema o centro de gravidade da plataforma (barco). As rotações possibilitam a análise da estabilidade e podem ser obtidas com equipamentos especiais: sensor de inclinação, sensor de elevação, medidor de aceleração, receptores GNSS e outros.

Em levantamentos batimétricos com ecobatímetro monofeixe as rotações *roll* (eixo X) e *pitch* (eixo Y) agregam erros as observações somente se a amplitude destes for maior do que a metade da largura do feixe. Em determinadas aplicações estes efeitos podem ser desconsiderados. A medição da rotação em torno do eixo Z (*yaw*), em sondagens com equipamentos monofeixe, não é significativa se a antena *rover* do RTK e o transdutor forem instalados centrados na vertical. Caso contrário deverá ser corrigido este efeito (OHI, 2005).

#### 2.3.4 Integração ecobatímetro, GNSS e sistema Inercial

A integração envolve três sistemas: o acústico, o inercial e o GNSS. Ela é realizada em um computador portátil, através de um software específico. A posição de cada sensor utilizado é determinada em relação ao sistema de referência da embarcação (centro de massa ou arbitrário).

Existem dois problemas com relação a integração GNSS e ecobatímetro: todos os sensores apresentam retardo interno entre o tempo de processamento e comunicação com a interface e os relógios do sistema GNSS e do ecobatímetro não são sincronizados (KRUEGER, 1999).

Em levantamentos realizados em águas interiores, que não tenham como finalidade a navegação, geralmente não são utilizados *Inertial*

*Measurement Unit* (IMU), somente receptores GNSS e ecobatímetro. A integração dos dados de profundidade e posição neste caso é feita com a instalação do receptor GNSS e do sondador acústico em uma mesma linha vertical. Deve-se nesta situação medir a distância que o transdutor está imerso na água, e a altura da antena GNSS, ambos em relação ao nível d'água instantâneo.

#### 2.3.4.1 Interface NMEA 0183

A interface NMEA *National Marine Electronics Association* (NMEA) 0183 padrão, é um protocolo de dados e tempo destinada à transferência de dados em série tendo como base um emissor e vários receptores. O dado é apresentado no formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) e pode agregar as seguintes informações: posição, velocidade, profundidade, frequência, quantidade de satélites, parâmetros de rastreamento de satélites e outros (NMEA, 2014).

#### 2.3.5 Velocidade de propagação do som na água

As ondas eletromagnéticas se propagam muito pouco nos líquidos, porém como solução para obtenção de profundidades as ondas acústicas, sônicas ou ultrassônicas apresentam uma propagação adequada em meios elásticos, submetidos à vibração em função da pressão (OHI, 2005).

A temperatura, a salinidade, a pressão e a densidade são fatores que alteram a velocidade de propagação do som na água. A variação de 1°C na temperatura corresponde a uma mudança de 4,5 m/s. Uma flutuação de 1% da salinidade implica em uma diversidade de 1,3 m/s. A pressão depende da profundidade e a cada 10 atmosferas ou aproximadamente 100m gera uma inconstância de 1,6 m/s na velocidade de propagação do som na água. A densidade depende da temperatura, da salinidade e da pressão e o maior impacto deve-se a compressibilidade que está relacionada à profundidade, ou

seja, no espelho d'água uma densidade da massa d'água  $1028 \text{ kg/m}^3$  corresponderá a  $1051 \text{ kg/m}^3$  à 5000 m de profundidade (OHI, 2005).

Para medir a velocidade do som na água e a pressão pode ser utilizado o Perfilador de Velocidade do Som (SVP). Para determinar a salinidade da água do mar utiliza-se um CTD (condutividade, temperatura e profundidade) que baseia-se medição de condutividade elétrica. Já para medir a temperatura da coluna d'água uma cadeia de termistores pode ser usada (OHI, 2005).

### 2.3.6 Princípios geométricos e físicos das ondas acústicas

A atenuação, a reflexão e a refração alteram a propagação da onda acústica na água. A atenuação esta relacionada à perda de energia em função da absorção, do espalhamento esférico e da dispersão. O espalhamento depende das irregularidades da superfície e do comprimento de onda, e corresponde à perda por reflexão do sinal. A dispersão representa a diminuição da intensidade do sinal acústico quando este se afasta do transmissor. A absorção refere-se à quantidade de energia transferida para o meio reduzindo a energia transmitida. A refração está relacionada à descontinuidade da propagação da onda acústica quando ela muda o meio. A energia refletida depende do material do fundo, areia e lama absorvem mais energia do que rochas e objetos metálicos (CORREA JUNIOR, 2008; SILVEIRA, 2004; OHI, 2005).

A reverberação representa o espalhamento do sinal emitido devido aos meios não homogêneos dos oceanos. Como resultado a recepção do sinal apresenta respostas indesejáveis, prejudicando a observação do eco do fundo real. No ambiente marinho ela pode estar relacionada ao plâncton, peixes e a rugosidade do fundo (CORREA JUNIOR, 2008).

Quanto maior o comprimento do impulso acústico maior será a profundidade medida pelo ecobatímetro. A duração do impulso deve ser pelo menos a metade do seu período normal, todavia deve se evitar períodos longos uma vez que este tem sua precisão vertical degradada (OHI, 2005). Na

(FIGURA 5) é ilustrada a precisão vertical em relação ao comprimento do impulso acústico.

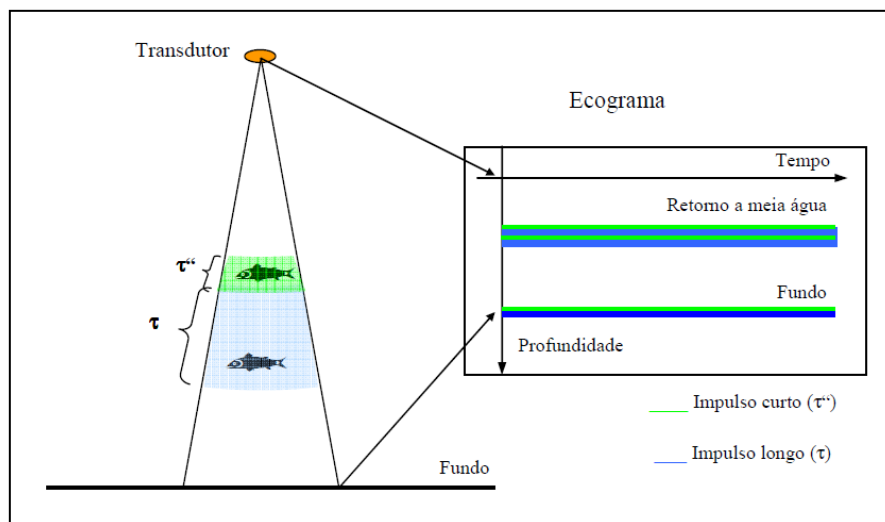


FIGURA 5 – RESOLUÇÃO VERTICAL COM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DO IMPULSO

FONTE: OHI (2005)

A frequência está relacionada ao alcance e a penetração da onda acústica nos sedimentos. Frequências maiores têm menor alcance, devido à absorção ao longo da coluna d'água, e frequências menores tem maior penetração no fundo (ARTILHEIRO, 2006). Ou seja, maiores frequências implicam em menor penetração na camada de sedimentos. Em área de profundidade rasa podem ser empregados transdutores de dupla frequência (FIGURA 6) para estimar a camada de sedimentos. Na (TABELA 4) são apresentadas as frequências empregadas geralmente nas sondagens batimétricas e respectivas profundidades. Sondadores de sedimentos, em geral, tem frequência menor que 8 kHz (OHI, 2005).

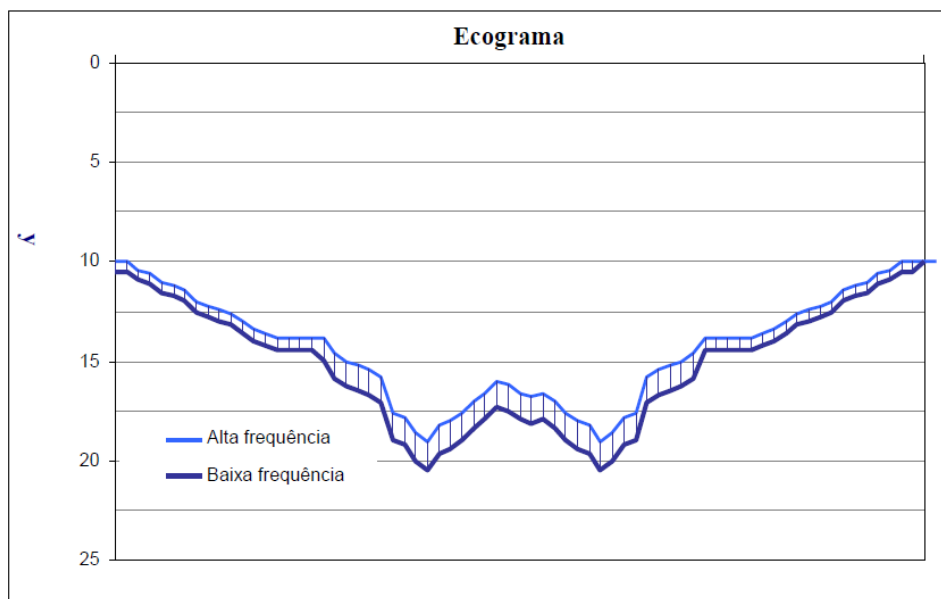


FIGURA 6 - ECOBATÍMETRO DE DUPLA FREQUÊNCIA

FONTE: OHI (2005)

TABELA 4 - FREQUÊNCIA DOS ECOBATÍMETROS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE

FREQUÊNCIA	PROFUNDIDADE
> 200 kHz	< 100 m
50 a 200 kHz	< 1500 m
12 a 50 kHz	> 1500m

FONTE: Adaptado de OHI (2005)

A cobertura do fundo para os ecobatímetros de feixe simples é dada pela equação 14, obtida da (FIGURA 7) (OHI, 2005):

$$a = 2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} \right) \quad (14)$$

Onde:

$a$ : a cobertura do fundo (área insonificada);

$z$ : profundidade;

$\varphi$ : abertura do feixe acústico.

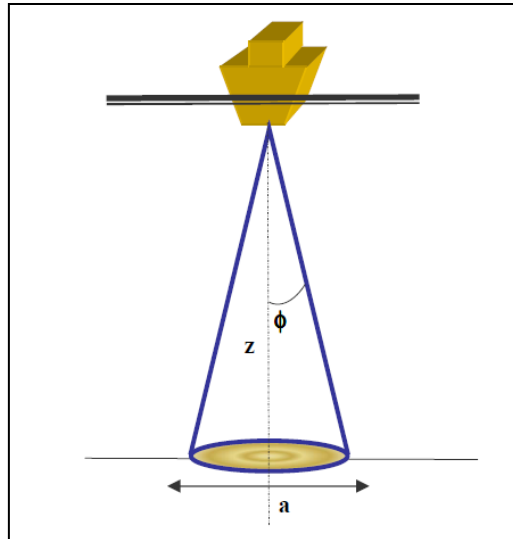


FIGURA 7 - PROJEÇÃO DO FEIXE SIMPLES NO FUNDO

FONTE: OHI (2005)

### 2.3.7 Reduções batimétricas

As reduções batimétricas são obtidas através das correções dos seguintes erros: instrumental, da posição do transdutor, dos movimentos da embarcação e das condições ambientais. A correção instrumental consiste em fazer coincidir o instante do tempo de transmissão do sinal acústico com o valor zero da escala de medição de profundidade. A correção da posição transdutor é positiva e corresponde a distância deste ao nível instantâneo da água. As correções dos movimentos da embarcação têm como objetivo eliminar os desvios do feixe acústico, devido as oscilações do barco no deslocamento sobre as linhas de sondagem, para tal são utilizados sensores que medem as rotações e translações do sistema de coordenadas da embarcação. As correções das condições ambientais são: da maré e das variações na velocidade de propagação do som na água (RAMOS, 2007).

A profundidade reduzida é calculada através da equação abaixo (RAMOS, 2007):

$$p_r = \frac{1}{2} v \cdot t + k + D_m + \varepsilon \quad (15)$$

Onde:

$p_r$ : profundidade reduzida (em relação a um nível de redução);

$v$ : velocidade média de propagação do som na água;

$t$ : intervalo de tempo entre a emissão e recepção do feixe acústico no transdutor;

$k$ : índice de correção instrumental do ecobatímetro;

$D_m$ : profundidade de imersão do transdutor em relação ao nível d'água instantâneo;

$\varepsilon$ : outras correções: variações dinâmicas de calado, variação do nível d'água, controle do nível d'água e outros.

Cabe ressaltar que neste trabalho não é necessário corrigir os efeitos de maré, pois o mesmo foi realizado em um reservatório.

### 2.3.8 Teste de latência

A latência é o atraso em segundos da transmissão dos dados coletados pelos equipamentos utilizados na sondagem batimétrica para o computador utilizado no armazenamento e integração das observações. O teste de latência determina um valor fixo positivo para o atraso entre o ecobatímetro e o GNSS. O relógio do computador também deve ser sincronizado ao tempo GPS (HYPACK, 2010).

O teste de latência é realizado da seguinte forma (HYPACK, 2010):

- Executar linhas de sondagens batimétricas recíprocas, sobre um fundo que tenha uma inclinação;
- A variação do nível d'água deve ser lenta;
- A linha planejada deve ser navegada o mais correto possível;

- Observar a qualidade do sinal e a quantidade de satélites visíveis durante a sondagem.

Segundo Ramos (2007), o valor do tempo de latência é dado pela equação:

$$TD = \frac{d_a}{v_h - v_l} \quad (16)$$

Onde:

$TD$ : tempo de latência (s);

$d_a$ : deslocamento ao longo da linha de sondagem (m);

$v_h$ : velocidade máxima (m/s) do barco;

$v_l$ : velocidade mínima (m/s) do barco.

### 2.3.9 Posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK)

O RTK é uma técnica alternativa do posicionamento diferencial que utiliza as observações brutas da fase da onda portadora ou suas correções diferenciais (RAMOS, 2007). A técnica *Differential Global Positioning System* (DGPS) utiliza o código ou o código suavizado pela onda portadora.

Um sistema de posicionamento RTK basicamente contém dois conjuntos receptores/antenas GNSS L1 ou L1 e L2, link de comunicação de rádio para transmitir (a uma taxa mínima de 2400 bits por segundo) e receber as correções das observáveis da estação base e um software para executar o processamento dos dados em tempo real. No sistema de rádio utiliza as faixas de frequência *Ultra High Frequency* (UHF) ou *Very High Frequency* (VHF) (MONICO, 2008).



As correções diferenciais, oriundas da estação base, são aplicadas diretamente na fase observada da estação itinerante e são transmitidas em tempo real através do protocolo de comunicação *Radio Technical Commission for Maritime Services – Special Committee 104* (RTCM SC-104). Aplicando-se uma dupla diferença de fase (DDF) sobre as observações da fase e da pseudodistância obtém-se precisão centimétrica no posicionamento. A solução fixa das ambiguidades da fase da onda portadora dos receptores em movimento utiliza a inicialização automática “*On the fly*” (OTF) ou “*On the way*” (OTW). O tempo de fixação das ambiguidades (TTFA) depende do comprimento da linha de base e poderá ser igual a uma época para determinadas situações. (OHI, 2005; RAMOS, 2007; SEEBER, 2003).

Para linhas bases curtas, até 10 km, na qual as estações móvel e de referência rastreiam a mesma constelação de satélites (no mínimo 5) é possível eliminar os erros dos: relógios, efeitos atmosféricos e orbitas dos satélites, que são eliminados através da correlação das observações das estações (RAMOS, 2007).

A transmissão é feita da estação de referência para a itinerante através de rádio ou modem *Global System for Mobile Communications* (GSM). A precisão do levantamento é de ordem centimétrica.

#### 2.3.9.1 Compact Measurement Record

O formato *Compact Measurement Record* (CMR/ CMR+) foi criado pela TRIMBLE com intuito de apresentar um padrão alternativo ao formato RTCM, no aspecto comercial. Este formato agrega o protocolo de mensagem e um algoritmo de compressão e descompressão de dados. Os blocos de mensagem CMR são enquadrados em cabeçalhos de 6 *bytes*. Para o levantamento RTK as mensagens enviadas neste formato são (TRIMBLE, 2014):

- Medidas;
- Localização da estação de referência;

- Descrição da estação de referência;

Em cada mensagem são enviados as seguintes informações de cabeçalho:

- Número da versão;
- Identificador da estação;
- Tipo de mensagem;
- Sinalizador de bateria fraca;
- Sinalizador de pouca memória;
- Época;
- Compensação de relógio.

#### 2.3.10 Processamento e análise dos dados

A OHI (2005) apresenta as seguintes etapas para processamento dos dados:

- Integração dos dados de posição dos sensores e do sistema GNSS;
- Correções dos dados de atitude da embarcação;
- Velocidade de propagação do som na água, correções devido à refração;
- Integração das posições com as profundidades, correções da latência e da geometria dos sensores.

A interpretação do ecograma é feita com intuito de identificar ecos falsos e múltiplos. Os ecos falsos são causados por materiais em suspensão ou peixes e não correspondem ao fundo verdadeiro. Para solucionar estes problemas recomenda-se a realização de sondagens complementares no local. Os ecos múltiplos devem-se as reflexões múltiplas e geralmente corresponde a um múltiplo da profundidade correta (OHI, 2005).

### 2.3.10.1 Fontes de erros

As fontes de erros de um sondador acústico devem-se à (OHI, 2005):

- Declividade do fundo submarino, do curso d'água ou do lago;
- Incertezas na velocidade de propagação do som na água;
- Incerteza na medição do tempo;
- Movimentos *roll*, *pitch* e *heave*;
- Calado.

### 2.3.10.2 Incerteza Horizontal Total (IHT)

A IHT refere-se às incertezas na determinação da posição de cada profundidade levantada. Todos os fatores que influenciam na localização deverão ser considerados. Ela é medida a um nível de confiança de 95% e está atrelada a um sistema geodésico de referência, neste trabalho ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000. As incertezas de posição deverão atender aos seguintes requisitos da OHI (2008):

- Ordem Especial: 2 m;
- Ordem 1a: 5 m + 5% da profundidade;
- Ordem 1b: 5 m + 5% da profundidade;
- Ordem 2: 20 m + 10% da profundidade.

### 2.3.10.3 Incerteza Vertical Total (IVT)

A IVT agrega todas as incertezas presentes nas medidas das profundidades reduzidas. A incerteza refere-se ao nível de confiança de 95%, na correção dos erros sistemáticos. Conhecidos os erros a IVT pode ser calculada pela equação (OHI, 2008):

$$IVT = \pm \sqrt{a^2 + (b.d)^2} \quad (17)$$

Onde:

$a$  : parcela da incerteza que não depende da profundidade;

$b$ : coeficiente que representa a parte da incerteza que depende da profundidade;

$d$  : profundidade.

Os parâmetros para o cálculo do IVT, conforme as ordens do levantamento são (OHI, 2008):

- Ordem Especial:  $a = 0,025$  m e  $b = 0,0075$ ;
- Ordem 1a:  $a = 0,5$  m e  $b = 0,013$ ;
- Ordem 1b:  $a = 0,5$  m e  $b = 0,013$ ;
- Ordem 2:  $a = 1,0$  m e  $b = 0,023$ .

Segundo a OHI (2005), a incerteza da profundidade reduzida, a um nível de confiança de 68% (ou  $1\sigma$ ), pode ser obtida pela equação:

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{Zc}^2 + \sigma_{Zt}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{tide}^2} \quad (18)$$

Onde:

$\sigma_{Zc}^2$ : variância da profundidade causada pela incerteza na determinação da velocidade de propagação do som na água;

$\sigma_{Zt}^2$ : variância da profundidade provocada pela incerteza de medição do tempo;

$\sigma_h^2$ : variância devido à incerteza no *heave*;

$\sigma_i^2$ : variância total da profundidade em função da incerteza na imersão do transdutor na água;

$\sigma_r^2$ : variância devido à incerteza de leitura do ecograma;

$\sigma_{tide}^2$ : variância devido à incerteza na medição da maré.

Mais detalhes sobre o cálculo destas variâncias são obtidos no capítulo 3 do manual de hidrografia da OHI.

Segundo USACE<sup>19</sup> (2004) *apud* RAMOS (2007), o cálculo do Erro Total propagado (ETP), ao nível de confiança de 95% é obtido pela equação:

$$ETP = 1,96. \sqrt{\sigma_{BIAS}^2 + \sigma_{ERRO}^2} \quad (19)$$

Onde:

$\sigma_{BIAS}$ : média das diferenças entre as intersecções das sondagens regulares e de verificação;

$\sigma_{ERRO}$ : desvio padrão das diferenças entre as intersecções das sondagens regulares e de verificação.

O ETP tem que ser inferior a IVT calculado para cada tipo de levantamento, conforme as especificações da OHI para levantamentos hidrográficos S-44 (RAMOS, 2007).

## 2.4 MODELO DIGITAL DO TERRENO

O modelo digital de terreno (MDT) corresponde a um conjunto de dados em formato numérico, no qual a cada posição é possível associar um valor de

---

<sup>19</sup>US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), **EM 1110-2-1003 Engineering and Design Hydrographic Surveying. Change 1**. Department of the Army, Washington, 2004.

altitude com relação a um referencial geodésico, e a ele deve estar vinculado um método de interpolação (MATOS, 2007). Ele pode ser obtido através de fotogrametria, GNSS ou técnicas de topografia convencional, técnicas de sensoriamento remoto terrestre, batimetria e outros (ACHARYA; FAGERMAN; WRIGHT, 2000).

A geração de um MDT é subdividida em três fases: aquisição da amostras, processamento e análise espacial do modelo. A aquisição refere-se a coleta de dados. A modelagem engloba o formato da estrutura de dados e a definição da superfície de ajuste para representação contínua do relevo (NAMIKAWA *et al.*, 2003).

O MDT é obtido da superfície da terra sem cobertura vegetal e edificações, ou seja, da superfície física. O seu desvio padrão é determinado através da propagação de erros, utilizando dados que não fazem parte da modelagem. Uma avaliação externa do modelo é feita com dados obtidos por outras técnicas e métodos que podem ser correlacionadas com os dados de entrada, que não foram utilizados na geração do MDT. Para gerar um MDT alguns critérios são considerados: a densidade dos pontos (relacionada à discretização da superfície), classificação dos dados, distância entre pontos, a precisão dos dados em relação a sua distribuição espacial e a precisão dos subprodutos (KAREL; PFEIFER; BRIESE, 2006).

O MDT pode ser gerado em dois tipos de estrutura de dados: rede retangular (matricial) e rede de triângulos irregulares (TIN). A estrutura matricial consiste num arranjo de linhas e colunas e o valor digital de cada elemento refere-se à elevação. A rede regular é facilmente implementada, porém um número elevado de dados é necessário para representar a superfície de maneira consistente. O TIN é baseado em triângulos, e os vértices deste são os próprios pontos observados. Esta estrutura representa de maneira eficaz as variações de declividade do terreno, porém tem que calcular e recuperar as suas relações topológicas. Ele apresenta como desvantagem maior complexidade na implementação de algoritmos em relação à grade regular (WEIBEL; HELLER, 1991).

Segundo Namikawa *et al.* (2003), apesar da complexidade na geração de um TIN ele é mais preciso que a grade regular. Quando procura-se uma análise qualitativa dos dados utiliza-se uma estrutura matricial, quando o objetivo é trabalhar dados quantitativos recomenda-se a utilização do TIN.

A obtenção de elevações para geração de um MDT, em locais com ausência de dados requer interpolação de pontos. Segundo Oliveira (2010), para um determinado conjunto amostral de pontos da superfície física existem diversas triangulações, tornando-se necessário a definição de critérios para gerar a triangulação.

Neste trabalho será adotada a estrutura TIN e a rede de triângulos será gerada através da triangulação de Delaunay, que é o método adotado pelo *software* ArcGIS 10.1 . Também será utilizado o método de interpolação da Vizinhaça Natural, apresentando a superfície gerada no formato matricial.

Segundo Peucker *et. al.*(1979), numa estrutura de dados TIN o nó é considerada uma entidade primária. A topologia é obtida para cada nó identificando seus vizinhos, que são classificados no sentido horário a partir do norte no sistema cartesiano de coordenadas locais.

#### 2.4.1 Triangulação de Delaunay

A triangulação é um método de interpolação mais apropriado para grandes variações de declividade da superfície. Ela elimina grande parte da descontinuidade entre pontos vizinhanças ajustando uma superfície a partir de três pontos. Entre os diversos métodos de triangulação para modelagem de superfícies, a triangulação de Delaunay é mais conhecida e aplicada (MIRANDA, 2005).

Esta triangulação (FIGURA 8) consiste em gerar uma rede de triângulos o mais próximo do equilátero dentro do possível. Segundo Felgueiras (2014), ela é baseada nos seguintes princípios:

- Um circuncírculo que passa por três pontos (vértices) de um triângulo não contém nenhum outro ponto no interior do círculo;
- Nenhum triângulo se sobrepõe;
- Não existe intervalo entre triângulos na superfície.

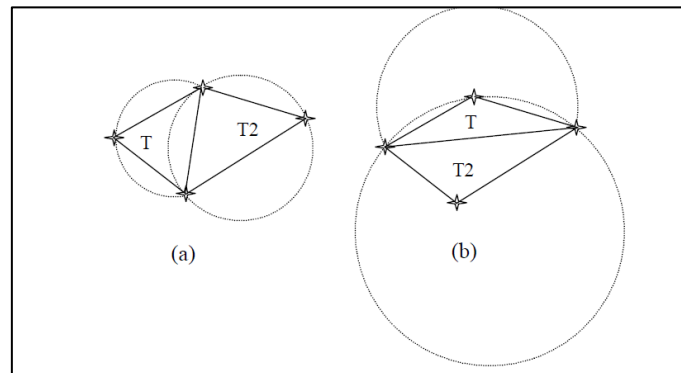


FIGURA 8 - CRITÉRIO DO CIRCUNCÍRCULO PARA GERAÇÃO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY

(a) T1 E T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay

FONTE: Felgueiras (2014)

A triangulação de Delaunay pode ser gerada por diversos métodos, um deles é o diagrama de Voronoi, que consiste em interligar os pontos internos entre polígonos adjacentes formando os triângulos. Também pode ser utilizado o princípio do circuncírculo e outros. A geração pode ser dividida em dois grupos: o primeiro relacionado ao diagrama de Voronoi; e o segundo baseado na divisão do espaço, na recursão, na fronteira convexa e na construção incremental (NAMIKAWA *et al.*, 2003).

A geração feita pelo diagrama de Voronoi, pode ser feita utilizando o algoritmo recursivo seguindo as etapas (PREPARATA; SHAMOS<sup>20</sup>, 1985, *apud* NAMIKAWA *et al.*, 2003):

- Particionar o conjunto de dados em dois subconjuntos similares;

<sup>20</sup> Preparata, F.P.; Shamos M.I. **Computational geometry**. New York, Springer-Verlag, 1985. 398 p.



- Gerar os diagramas de Voronoi recursivamente;
- Construir uma poligonal para separar os dois conjuntos de pontos;
- Eliminar todas as arestas do segundo conjunto que estão a esquerda, e todas as arestas à direita do primeiro conjunto.

Após a produção da rede de triângulos é possível interpolar elevações através de sistemas de equações lineares que envolvem os vértices do triângulo.

#### 2.4.2 Vizinhança natural

O método de interpolação da Vizinhança Natural é aplicado em distribuição irregular de pontos amostrais, e baseado na dual triangulação de Delaunay e diagrama de Voronoi. A triangulação de Delaunay não é única e está sujeita a problemas devido a posição dos vértices. Entretanto o diagrama de Voronoi é único (SUKUMAR *et al.*, 2001).

A interpolação pelo Vizinho Natural procura o subconjunto (polígonos vizinhos) da amostra de entrada mais próxima do ponto a ser interpolado, e para calcular a elevação aplica-se pesos proporcionais a área (SIBSON<sup>21</sup>, 1981, *apud* ESRI, 2014). Basicamente as alturas são determinadas localmente a partir um subconjunto de polígonos de Thiessen (diagrama de Voronoi) que circundam o ponto de interesse. A superfície é suavizada em toda parte, exceto em regiões que tem os pontos amostrais. Picos e vales só serão representados se comporem os dados de entrada. Na (FIGURA 9) é apresentado um exemplo da interpolação do ponto a partir do polígono de Voronoi.

---

<sup>21</sup> Sibson, R. A. Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. In\_. **Interpolating Multivariate Data**. New York: John Wiley & Sons, 1981. p. 21–36.

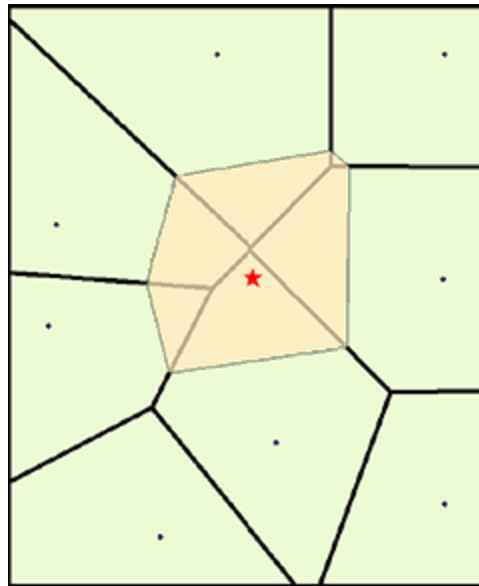


FIGURA 9 - EXEMPLO DA INTERPOLAÇÃO DE PONTOS PELO MÉTODO DO VIZINHO NATURAL

FONTE: ESRI (2014)

Para obter o valor da elevação interpolada inicialmente é gerado um diagrama de Voronoi com todos os pontos do conjunto amostral (do relevo) representados na cor verde (FIGURA 9). Um novo polígono de Thiessen (bege) é gerado em torno do ponto vermelho a ser interpolado, a proporção da sobreposição das áreas dos polígonos iniciais (verde) e do novo polígono corresponde ao peso na interpolação, sendo similar ao inverso da distância ponderada (ESRI, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o local de estudo, equipamentos utilizados e os métodos adotados na coleta e processamento dos dados. Na parte de coleta de dados são apresentados os equipamentos e a metodologia aplicada para reduzir as sondagens batimétricas ao nível de redução. Também é apresentada uma descrição sucinta de como obteve-se os modelos digitais de terreno e quais os interpoladores usados.

#### 3.1 LOCAL DE ESTUDO

A usina hidrelétrica Mauá (FIGURA 10) esta localizada entre as coordenadas geodésicas<sup>22</sup> 24°03'32" S e 50°42'44" W, e 24°03'36" S e 50°42'18" W no rio Tibagi, município de Telêmaco Borba no estado do Paraná. A potência instalada é de 352 MW na usina principal e 11 MW na usina secundária, o que corresponde a uma potência total de 363 MW. O reservatório tem uma área de 83,9 km<sup>2</sup> quando operado no nível máximo normal com altitude ortométrica de 635 m. A altura máxima do barramento é 85 m e o comprimento da crista é de 745 m (UHE MAUÁ, 2014).

---

<sup>22</sup> Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000.

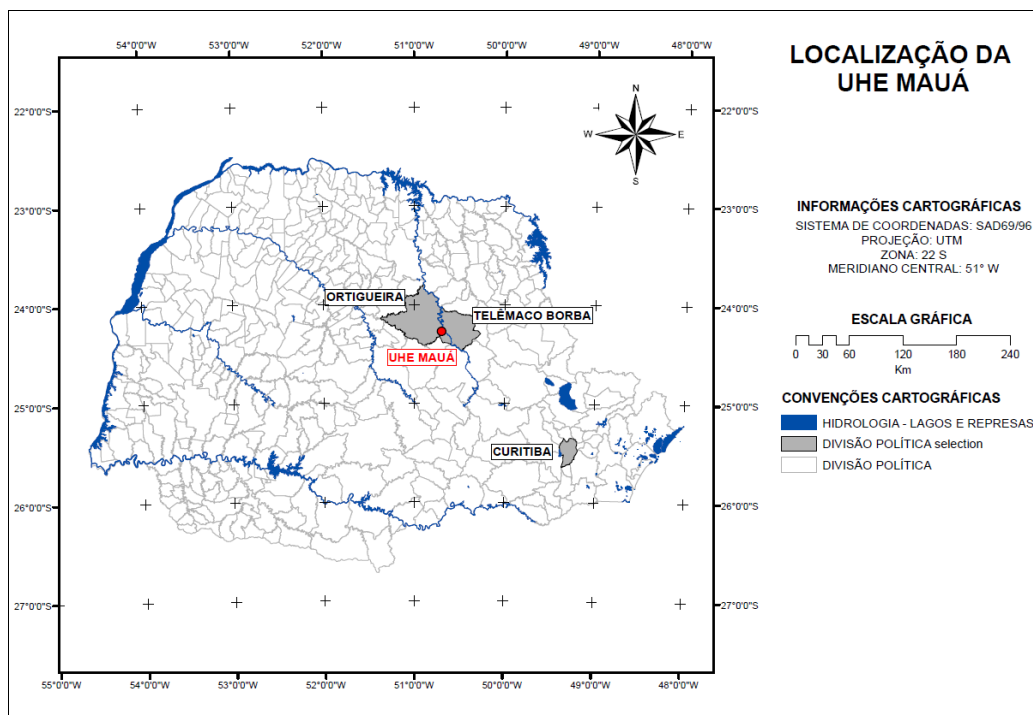


FIGURA 10 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ

FONTE: Silva (2012)

### 3.2 LEVANTAMENTO LASER ASSOCIADO AO LASER SCANNER

O levantamento Laser foi realizado em 7 de março de 2012, pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) denominado *“Levantamento Geológico- Estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o Monitoramento Geodésico nos pontos de risco”*. Foi utilizada a aeronave SENECA III e no apoio de campo foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Câmera aérea digital Trimble Pro P65+ 60 Megapixel<sup>23</sup>:
  - Lente de 50 mm;
  - Compensador de arrasto *Forward Motion Control* (FMC);
  - Dimensão do pixel de 6  $\mu$ m.

<sup>23</sup> TRIMBLE Navigation Limited. **Trimble Aerial Camera**. Westminster, Estados Unidos da América, 2011. Catálogo.

- Laser Scanner Aerotransportado Optech, modelo *Airbone Laser Terrain Mapper* (ALTM) 2050<sup>24</sup> :
  - Frequência do pulso Laser de 50 kHz (50000 pulsos por segundo);
  - Divergência do feixe a 650m (nominal): 0,20 mrad;
  - Altitude de operação de 200 a 2000m (nominal);
  - Frequência de varredura de 0 a 100 Hz;
  - Ângulo de varredura de 0° a 40°;
  - Precisão horizontal de 0,50m – 1sigma a 1000m, nominal;
  - Precisão vertical de 0,15m – 1 sigma a 1000m, nominal;
  - Número de 1 a 4 pontos por m<sup>2</sup>;
- Sistema Inercial Applanix 200 Hz;
- Receptor GNSS da aeronave Novatel Millennium L1 e L2;
- Receptor GNSS Trimble 5700 L1 e L2, utilizado no apoio de campo.

O recobrimento aéreo foi feito a uma altura média de voo de aproximadamente 900m, a largura da faixa é de 650m e a dimensão do *pixel* no terreno é de 10 cm. A estação denominada Telêmaco Borba, coordenadas geodésicas <sup>25</sup> 24°20'00,56823"S e 50°37'30,64464"W, e altitude elipsóidica de 756,5269m foi utilizada como estação base GNSS do voo apoiado. O transporte de coordenadas para este vértice foi realizado a partir das estações PPTE (Presidente Prudente) e ROSA (Rosana), localizadas no estado de São Paulo, e PRMA (Maringá) no Paraná da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

---

<sup>24</sup> OPTTECH INCORPORATED. **ALTM 2050 Airbone Laser Terrain Mapper: The Ultimate in Performance**. Toronto, 2002. Catálogo.

<sup>25</sup> Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000.

Na (FIGURA 11) apresenta-se a imagem da situação da implantação da UHE Mauá em 7 de março de 2012, produzidas na cobertura aerofotogramétrica.

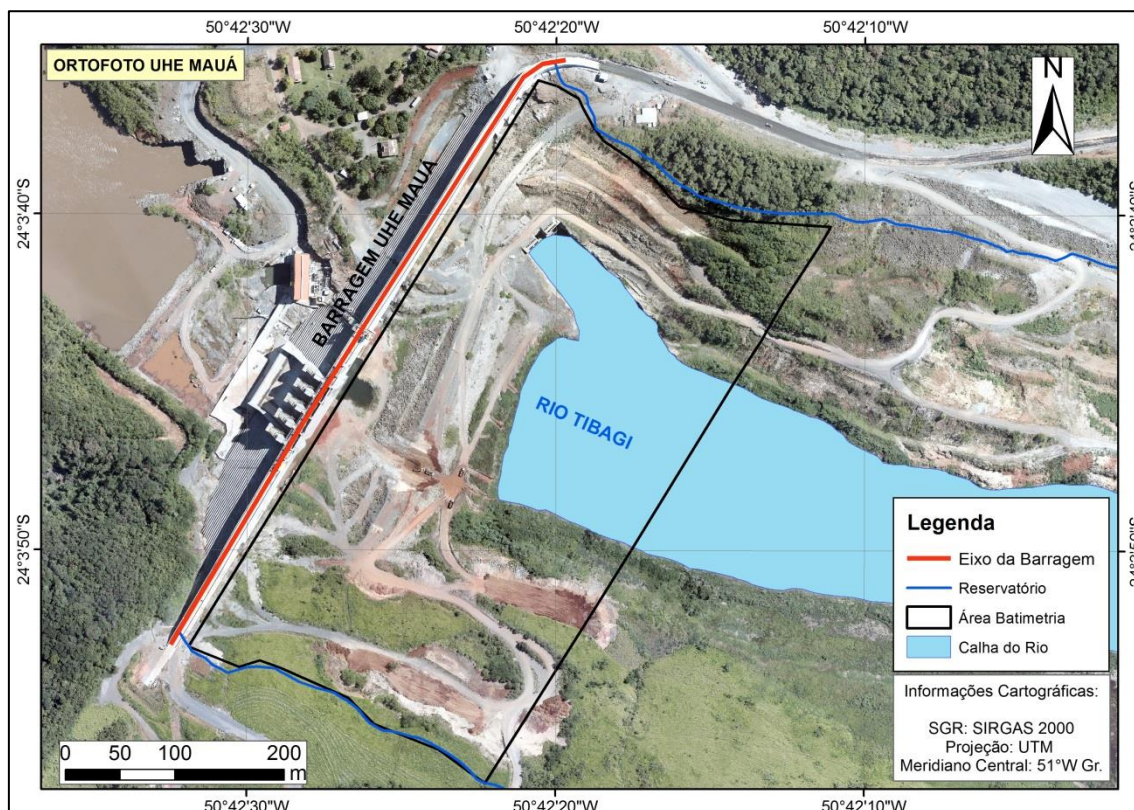


FIGURA 11 - IMAGEM DA UHE MAUÁ EM 7 DE MARÇO DE 2012 OBTIDA NA COBERTURA AEROFOTOGRAFAMÉTRICA

FONTE: O autor (2014)

O referencial planimétrico adotado é o SIRGAS 2000, e os produtos cartográficos, ortofotos e Modelo Digital do Terreno (MDT), foram elaborados considerando como referência altimétrica a altitude elipsoidal vinculada ao SIRGAS 2000. As representações cartográficas foram feitas na projeção cartográfica *Universal Transverse Mercator* (UTM) fuso 22. As ortofotos foram elaboradas na escala 1: 1000 e as curvas de níveis tem equidistância de 1m.

Os pilares PG-01, PG-02 e PG-03, implantados pelo projeto de P&D da UHE Mauá, próximos à barragem foram utilizados como pontos de controle no processamento da aerotriangulação, uma vez que são foto identificáveis. As

coordenadas dos pilares rastreados e extraídas das fotografias, e as diferenças encontradas são apresentadas na (TABELA 5).

TABELA 5 - DIFERENÇAS ENTRE AS COORDENADAS UTM DOS PILARES RASTREADAS COM GNSS E LIDAS NAS ORTOFOTOS

PILAR	E (m)		$\Delta E$ (m)	N (m)		$\Delta N$ (m)	h (m)		$\Delta h$ (m)
	GNSS	IMAGEM		GNSS	IMAGEM		GNSS	IMAGEM	
PG01	530041,191	530041,177	0,014	7339075,202	7339075,229	-0,027	643,377	643,448	-0,071
PG02	529585,100	529585,083	0,017	7338470,443	7338470,385	0,058	654,703	654,735	-0,032
PG03	529586,486	529586,453	0,033	7339063,031	7339063,018	0,013	588,724	588,755	-0,031
	MÉDIA		0,021	MÉDIA		0,015	MÉDIA		-0,045

SGR: SIRGAS 2000 - Projeção UTM Fuso 22

FONTE: O autor (2014)

### 3.3 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

#### 3.3.1 Materiais

Para execução dos levantamentos batimétricos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Receptor GNSS TOPCON HIPER LITE L1 e L2 (TOPCON, 2004):
  - Tempo de inicialização de 5 s até 10 min, depende do comprimento da linha de base e dos efeitos de multicaminho;
  - Ambiguidade inicializada: OTF (L1 ou L1 e L2);
  - Latência 20 a 30ms, para extrapolação;
  - Saída NMEA 0183 versões 2.1, 2.2, 2.3 e 3.0;
  - Precisão Horizontal no modo cinemático em tempo real (RTK), de 10 mm + 1 ppm x comprimento da linha de base;

- Precisão Vertical modo cinemático em tempo real (RTK), de 15 mm + 1 ppm x comprimento da linha de base;
- Frequência do Link de Rádio, de 902 a 928 MHz.
- Ecobatímetro *Reson Navisound 215*<sup>26</sup>:
  - Frequência Padrão: 28 – 35 e 190-225 kHz;
  - Potência Máxima: 300 W;
  - Acurácia: 1 cm para 210 kHz (1 $\sigma$ ) e 7 cm para 33 kHz (1 $\sigma$ );
  - Canais: 1/2;
  - Alcance da Profundidade 0,2 a 600m.

### 3.3.2 Planejamento levantamento batimétrico

Segundo CARVALHO *et al.* (2000), a DHN orienta que o espaçamento entre as linhas de sondagens batimétricas regulares (transversais a margem do reservatório), devem ter equidistância de 1 cm na escala do mapa gerado como produto da batimetria executada.

Considerando os objetivos propostos neste trabalho e também pelo fato que as ortofotos foram elaboradas na escala 1: 1000, as linhas de sondagem batimétricas foram realizadas a cada 10 m, o que representa 1 cm na escala 1: 1000 (escala das ortofotocartas do levantamento Laser), conforme diretrizes apresentadas anteriormente.

---

<sup>26</sup> TELEDYNE RESON: NaviSound 215 Portable Hydrographic Echosounder. Disponível em: < <http://www.teledyne-reson.com/wp-content/uploads/2011/06/NaviSound-215.pdf> >. Acesso em: 12/12/2014.



Definiu-se inicialmente que seria levantada uma faixa de 700m a montante da barragem da usina, entretanto devido ao prolongado período de estiagem e o prazo estabelecido para conclusão da pesquisa, entre outras dificuldades, optou-se por diminuir a área de batimetria.

O levantamento foi executado numa área de 170382,44 m<sup>2</sup>, situada imediatamente a montante do barramento com extensão de 300 m. Foram levantadas 31 linhas de sondagens batimétricas regulares e 10 linhas de verificação com espaçamento de 50 m (9 linhas) e 100 m (1 linha) entre elas, o que se enquadra nas recomendações da OHI (2008) que estipula uma linha de verificação a cada 15 linhas de sondagens regulares. O espaçamento máximo definido pela OHI (2008) correspondente 15 vezes o espaçamento das sondagens batimétricas regulares (10 m) e eiva a 150 m neste caso. No (APÊNDICE 1) apresenta-se um mapa do planejamento das linhas de sondagem batimétricas da UHE Mauá.

Considerando as diretrizes estabelecidas na resolução ANA/ANEEL, percebe-se que no caso do reservatório da UHE Mauá não é obrigatória à atualização da curva cota x área x volume neste momento, uma vez que o empreendimento entrou em operação comercial em dezembro de 2012. A resolução ANA/ANEEL de 2013 requer o levantamento de todo o reservatório, e o espaçamento das seções batimétricas (aproximadamente 100 m) é maior do que o planejado neste trabalho. Entretanto se for adotada a metodologia proposta na resolução, para a estimativa do assoreamento, à precisão do levantamento batimétrico será inferior à obtida no levantamento Laser, devido ao espaçamento de 100 m entre as sondagens batimétricas

### 3.3.3 Coleta de dados

A coleta de dados foi feita nos dias 3, 4 e 5 de setembro de 2014. No dia 21 de agosto de 2014 foi realizado o teste de latência no reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza, situada no Rio Capivari, próximo as divisas entre os estados de Paraná e São Paulo (FIGURA 12).

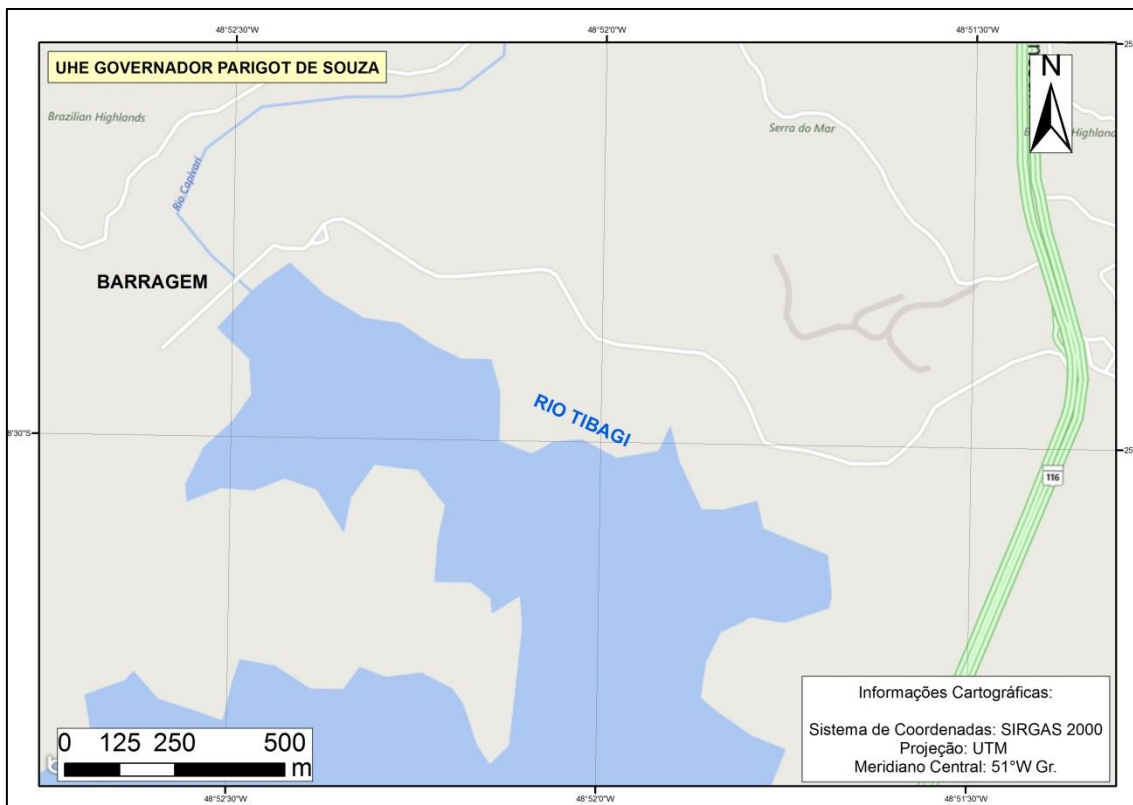


FIGURA 12 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE GOVERNADOR PARIGOT DE SOUZA

FONTE: O autor (2014)

A antena GNSS e o transdutor foram instalados na mesma linha de referência vertical (com relação ao espelho d'água), fixados em uma mesma haste metálica, que coincide com o eixo Z do sistema de coordenadas da embarcação. Na (FIGURA 13) apresenta-se os equipamentos instalados no barco. Segundo Ferreira (2013), a instalação da antena GNSS e do transdutor do ecobatímetro de forma sincronizada permite a eliminação das medidas dos *offsets* e das rotações em torno do eixo Z (*heading*). Considerando ainda a velocidade da embarcação, a abertura do feixe cônico e o fato de o reservatório não ter correnteza e ondas não foi necessário corrigir *pitch*, *roll* e *heave*. Então antes do início da coleta de dados foram determinados os seguintes *offsets* verticais:

- Altura vertical da antena GNSS em relação ao nível instantâneo da água;
- Imersão do transdutor em relação ao nível da água instantâneo.

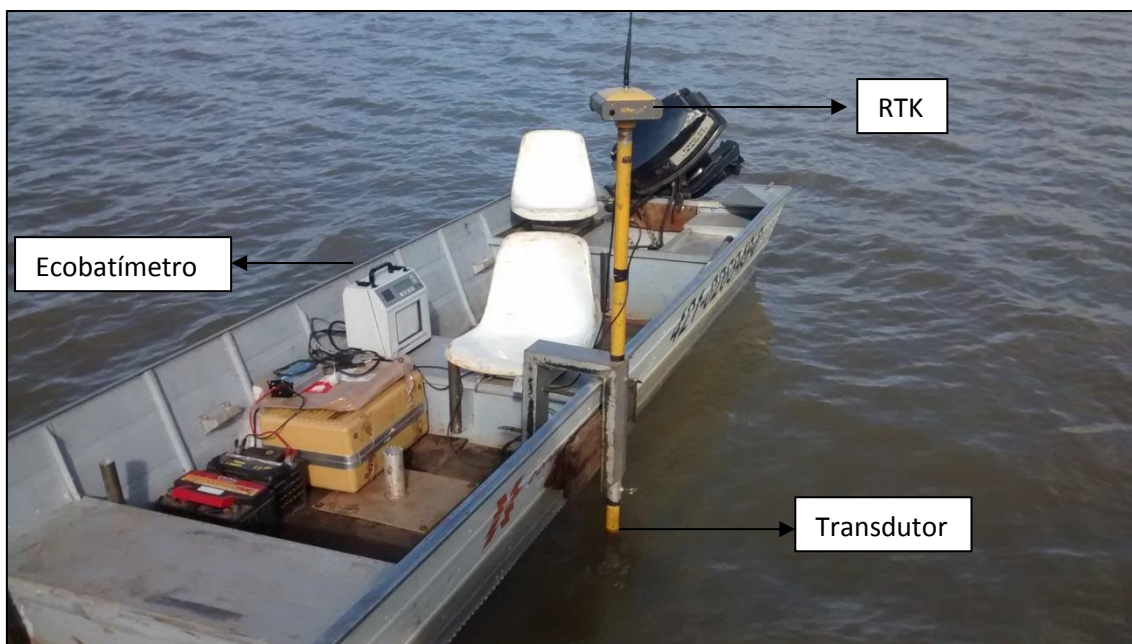


FIGURA 13 - EMBARCAÇÃO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

FONTE: O autor (2014)

A velocidade de propagação do som na água foi calibrada e corrigida utilizando uma trena com um peso acoplado. Os valores do ganho, potência de transmissão do sinal acústico, impulso acústico e o *range* foram ajustados durante a coleta de dados, considerando a profundidade, o tipo de fundo e o perfil do fundo visualizado em tempo real durante o levantamento.

A posição de cada profundidade observada foi determinada pelo método de posicionamento GNSS RTK (*Real Time Kinematic*). A taxa de gravação dos dados adotado foi de 1s, a estação base ocupou o pilar geodésico PG-02 (FIGURA 14) implantado na margem esquerda do reservatório e próximo ao barramento da UHE Mauá. O envio das correções da fase da portadora foi transmitido através do padrão CMR+, por link de rádio interno com frequência de transmissão de 915 MHz. A latência no modo de extrapolação, que é o utilizado na coleta de dados em movimento, é de 20 a 30 ms (TOPCON, 2004).



FIGURA 14 - ESTAÇÃO BASE PILAR GEODÉSICO PG-02

FONTE: O autor (2014)

A integração dos dados do ecobatímetro e do receptor GNSS RTK realizaram-se no *software* Hypack 2010. A velocidade média da embarcação durante a coleta de dados foi de aproximadamente de 2 m/s.

### 3.3.4 Processamento dos dados

A integração dos dados batimétricos e de posição planimétrica realizaram-se através da sincronização do tempo, vinculado ao tempo GNSS. A latência entre a observação dos dados GNSS e a transmissão das correções da fase da portadora, da estação base para estação móvel, foi 1 segundo.

O pré-processamento dos dados foi realizado no *software* Hypack 2010. No processamento foram aplicadas as correções dos *offsets* verticais, latência e eliminação dos erros grosseiros (*spikes*) oriundos do posicionamento e da batimetria. Esta etapa consistiu na análise de ecograma. na (FIGURA 15) podem ser observados os dados brutos e na (FIGURA 16) o perfil do fundo editado. Observa-se que os registros inconsistentes não seguem uma linha de tendência. Feito o pré-processamento realizou-se a redução das sondagens.

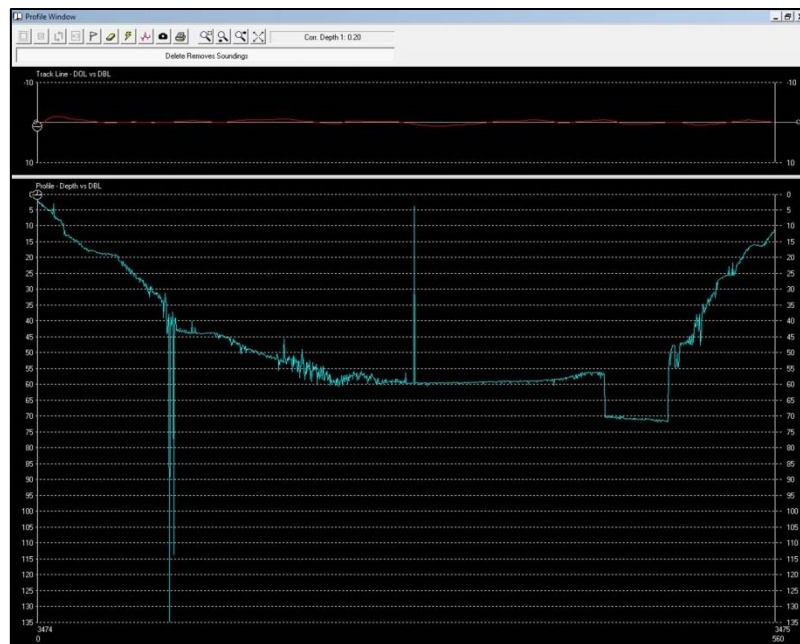


FIGURA 15 - PERFIL GERADO COM OS DADOS BRUTOS DA LINHA REGULAR 13

FONTE: O autor (2014)



FIGURA 16 - PERFIL EDITADO DA LINHA DE SONDAGEM REGULAR 13

FONTE: O autor (2014)

O nível d'água do reservatório sofre variações durante o dia em função da demanda de energia elétrica dos usuários. O controle do nível d'água é feito pelos operadores da usina através da abertura e fechamento das

comportas. Considerando que a execução do levantamento batimétrico é realizada utilizando o nível d'água instantâneo do reservatório como nível de redução das sondagens batimétricas, é necessário corrigir as oscilações do nível d'água em função do tempo com intuito de obter as profundidades reais. Estas correções podem ser feitas: aplicando as altitudes observadas (corrigidas) em tempo real obtidas com RTK, rastreamento GNSS do nível d'água antes e após a coleta de dados batimétricos e correção das profundidades utilizando as observações do nível d'água a partir de régua limimétrica.

Na UHE Mauá foi implantada uma estação telemétrica que observa de modo automático o nível d'água do reservatório em intervalos de 15 em 15 min. Esta estação está instalada na barragem e as observações por ela realizadas podem ser obtidas no site do SIMEPAR.

Foram adotadas as seguintes técnicas para redução das sondagens batimétricas:

1. As profundidades reduzidas foram determinadas considerando o valor da altitude elipsóidica do nível d'água obtida em tempo real durante a coleta de dados (RTK instalado no barco);
2. As profundidades reduzidas foram obtidas considerando as observações do nível d'água realizados na margem do reservatório no início e final do levantamento batimétrico com RTK (FIGURA 17).
3. As profundidades reduzidas foram obtidas aplicando as diferenças de níveis observadas pela estação telemétrica a cada 15min.





FIGURA 17 - RASTREIO GNSS DO NÍVEL D'ÁGUA PELO MÉTODO DE POSICIONAMENTO RTK ESTÁTICO

FONTE: O autor (2014)

Na técnica 1 utilizou-se a equação 20 para obter as altitudes elipsóidicas da nuvem de pontos do fundo do reservatório:

$$h_{fundo} = h_{NA\ RTK} - l_m - (p_{obs} + D_m) \quad (20)$$

Onde:

$h_{fundo}$  : altitude elipsóidica do fundo do reservatório;

$h_{RTK-MÓVEL(t)}$ : altitude elipsóidica observado pelo RTK instalado no barco no instante  $t$ ;

$p_{obs}$  : profundidade observada pelo ecobatímetro;

$l_m$  : altura vertical da antena GNSS em relação ao nível d'água instantâneo;

$D_m$  : profundidade de imersão do transdutor em relação ao nível d'água instantâneo.

Os níveis d'água da técnica 2 foram levantados no início e no final de cada dia de levantamento batimétrico. Como o nível d'água variou durante um intervalo de tempo, obteve-se as equações lineares 21 a 23 que têm como objetivo calcular o nível d'água em função do tempo para cada profundidade observada. Conhecido os instantes e os valores do nível d'água (TABELA 6) observados obteve-se as linhas de tendência apresentadas a seguir.

TABELA 6 - COORDENADAS UTM E ALTITUDE ELIPSÓIDICA DOS NÍVEIS D' ÁGUA OBSERVADOS NA MARGEM DIREITA DO RESERVATÓRIO

PONTO	DATA	HORAS	E (m)	N (m)	h (m)
NA01	03/09/2014	13:56:23	529948,527	7339092,948	631,684
NA02	03/09/2014	16:56:00	529967,299	7339073,056	631,676
NA03	04/09/2014	09:05:41	529968,433	7339070,699	631,707
NA04	04/09/2014	16:57:22	529968,274	7339070,726	631,655
NA05	05/09/2014	08:34:47	529966,248	7339074,681	631,605
NA06	05/09/2014	14:12:45	529966,077	7339075,137	631,591

SGR: SIRGAS 2000 - Projeção UTM Fuso 22

FONTE: O autor (2014)

$$h_{NA-d1} = -7.10^{-7}.t + 631,72 \quad (21)$$

$$h_{NA-d2} = -2.10^{-6}.t + 631,77 \quad (22)$$

$$h_{NA-d3} = -7.10^{-7}.t + 631,72 \quad (23)$$

Onde:

$h_{NA-d1}$  : altitude elipsóidica do nível d'água, num instante  $t$ , no dia 03 de setembro de 2014;

$h_{NA-d2}$  : altitude elipsóidica do nível d'água, num instante  $t$ , no dia 04 de setembro de 2014;

$h_{NA-d3}$  : altitude elipsóidica do nível d'água, num instante  $t$ , no dia 05 de setembro de 2014;

$t$ : horário em segundos a partir da meia noite que a profundidade foi observada.



As altitudes elipsóidicas do fundo do reservatório foram obtidas pela equação:

$$h_{fundo} = h_{NA-di} - (p_{obs} + D_m) \quad (24)$$

Onde:

$h_{fundo}$  : altitude elipsóidica do fundo do reservatório;

$h_{NA-di}$  : altitude elipsóidica do nível d'água estimado, para o instante  $t$ ;

$p_{obs}$  : profundidade observada pelo ecobatímetro;

$D_m$  : profundidade de imersão do transdutor em relação ao nível d'água instantâneo.

Na técnica 3 utilizou-se a equação 25 para obter as altitudes elipsóidicas dos pontos do fundo do lago:

$$h_{fundo} = h_{NA\ régua(t)} - (p_{obs} + D_m) \quad (25)$$

Onde:

$h_{fundo}$  : altitude elipsóidica do fundo do reservatório;

$h_{NA\ régua(t)}$  : altitude elipsóidica do nível d'água observado pela régua linimétrica no instante  $t$ ;

$p_{obs}$  : profundidade observada pelo ecobatímetro;

$D_m$  : profundidade de imersão do transdutor em relação ao nível d'água instantâneo

### 3.4 MODELO DIGITAL DO TERRENO

A avaliação do assoreamento e da metodologia proposta utilizou como referência o Modelo Digital do Terreno (MDT). O limite do modelo corresponde às margens do rio antes e após o enchimento do reservatório. A calha original do rio Tibagi não foi utilizada na modelagem, pois no recobrimento aéreo utilizando o levantamento Laser não foram determinadas as profundidades do rio, somente o nível d'água para época de coleta de dados.

A geração dos modelos digitais de terreno, cálculo de volume das superfícies tridimensionais, cálculo do volume assoreado, comparação de MDTs foram realizadas no software ArcGIS 10.1, através da extensão *3D Analyst*. As gerações dos MDTs foram feitas através de rede de triângulos irregulares (TIN) e de imagens hipsométricas pelo método da Vizinhança Natural (matricial).

O MDT da área de entorno do reservatório, onde estão situadas as principais estruturas da UHE Mauá, foi elaborado com dados de levantamento Laser, conforme descrito no item 3.2. Este MDT está no formato ASCII, e contém as coordenadas tridimensionais de pontos distribuídos de forma irregular. Com estes dados foram geradas as superfícies pelos métodos TIN e da Vizinhança Natural.

Em setembro de 2014 foi realizado o levantamento batimétrico na área de estudo, conforme descrito no item 3.3. Os dados coletados foram divididos em sondagens regulares e sondagens de verificação. A nuvem de pontos da sondagem regular, perpendiculares ao curso d'água, foram utilizadas para gerarem os MDTs a partir do TIN e as imagens hipsométricas pelo método da Vizinhança Natural. Foram gerados para cada método de redução das sondagens batimétricas ao nível d'água instantâneo um TIN e também uma imagem no formato *TIFF* obtida pelo método de interpolação da Vizinhança Natural. Obteve-se portanto os seguintes MDTs:

- Nível d'água RTK Móvel: altitude elipsóidica do fundo do reservatório calculada a partir dos níveis d'água observados pelo RTK instalado no barco;
- Nível d'água RTK Estático: altitude elipsóidica do fundo do reservatório calculada a partir dos níveis d'água observados pelo RTK, sobre o espelho d'água, na margem direita do reservatório.
- Nível d'água Régua: altitude elipsóidica do fundo do reservatório calculada a partir dos Níveis d'água observados pela régua linimétrica instalada na barragem da UHE Mauá.

Os resultados obtidos podem ser visualizados nos mapas no Apêndice 2. Para facilitar a análise das superfícies TIN geradas no plano (2D) aplicou-se uma simbologia em que as faces dos triângulos são representadas por graduação de cores conforme a elevação do fundo do reservatório. O intervalo entre as classes foi definido como 10m. A mesma simbologia aplicada nos MDTs, obtidos pelo TIN, foi utilizada nas imagens hipsométricas no formato *raster*, obtidas pelo método da Vizinhança Natural (APÊNDICE 3).

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DA INCERTEZA VERTICAL TOTAL DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

Considerando a impossibilidade em levantar o fundo do lago com técnicas topográficas convencionais, realizou-se uma coleta de dados complementar, executada em sentido transversal as linhas de sondagens regulares (perpendicular ao talvegue) e denominadas sondagens de verificações (longitudinais ao curso d'água) com intuito de obter redundância de observações. Com estes dados nesta etapa foram avaliadas as intersecções entre as linhas de sondagens regulares e de verificação com intuito de estimar a precisão do levantamento batimétrico. Como não é possível reocupar os pontos observados, em função das condições de coleta de dados, adota-se um raio de busca para identificar pontos dentro de uma área que deveriam ter valores de profundidades iguais ou com diferenças entre eles não superior a uma tolerância estabelecida a partir do cálculo do IVT.

Segundo o Decreto nº 89817, de 20 de junho de 1984, de uma amostra de pontos de verificação 90% destes quando testados no terreno, deverão apresentar erro inferior ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (BRASIL,1984). Na (TABELA 7) são apresenta-se os valores de classificação de mapas de acordo com o PEC.

TABELA 7 - CLASSIFICAÇÃO DOS PRODUTOS CARTOGRÁFICOS - PEC

PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA - PEC				
CLASSE	PLANIMÉTRICO*	ERRO PADRÃO*	ALTIMÉTRICO**	ERRO PADRÃO**
A	0,5 mm	0,3 mm	1/2	1/3
B	0,8 mm	0,5 mm	3/5	2/5
C	1,0 mm	0,6 mm	3/4	3/8
*	na escala da carta			
**	da equidistância da curva de nível			

FONTE: Adaptado de BRASIL (1984)

Neste trabalho adotou-se um raio de busca de 50 cm, considerando o PEC planimétrico classe “A” para mapas na escala 1: 1000, que corresponde a 0,5 mm na escala do mapa.

Realizado o processamento dos dados determinou-se os valores do ETP para os três métodos adotados na redução das sondagens batimétricas. Nas (TABELA 8 a 10) apresentam-se os resultados.

TABELA 8 - AVALIAÇÃO DA IVT E DO PEC – NÍVEL DE REDUÇÃO DAS SONDAgens BATIMÉTRICAS OBTIDOS A PARTIR DO NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL

SONDAgens BATIMÉTRICAS		Média* (m)	0,07	
Intersecções	905	Desvio Padrão* (m)	0,39	
Profundidade Média (m)	41,45	ETP (m)	0,77	Atende em (%):
Tolerância IHO		IVT Ordem 1a (m)	0,74	96,24
		IVT Ordem Especial (m)	0,40	71,93
* da diferença entre as sondagens regulares e de verificações		PEC A	0,50	83,87
		PEC B	0,60	90,39

FONTE: O autor (2014)

Na (TABELA 8) observa-se que o processamento dos dados batimétricos, considerando que as altitudes elipsoidais do nível d'água instantâneo foram obtidas a partir do posicionamento RTK instalado na embarcação (durante a execução da batimetria), é classificado como PEC B Altimétrico, uma vez que mais de 90% dos pontos testados em campo apresentaram diferença menor ou igual a 60 cm que corresponde a três quintos da equidistância de 1 m das isolinhas, isto é, comparando as sondagens regulares e de verificação. Analisando a tabela observa-se que o ETP do levantamento é superior ao IVT das ordens especial e 1a, porém mais de 95% (nível de confiança) das intersecções apresentam diferenças menores que o IVT máximo para a ordem 1a.

TABELA 9 - AVALIAÇÃO DA IVT E DO PEC – NÍVEL DE REDUÇÃO DAS SONDAgens BATIMÉTRICAS OBTIDOS A PARTIR DO NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTATICO

SONDAgens BATIMÉTRICAS		Média* (m)	0,01	
Intersecções	905	Desvio Padrão* (m)	0,31	
Profundidade Média (m)	41,45	ETP (m)	0,61	Atende em (%):
Tolerância IHO		IVT Ordem 1a (m)	0,74	98,78
		IVT Ordem Especial (m)	0,40	77,02
* da diferença entre as sondagens regulares e de verificações		PEC A (m)	0,50	88,40
		PEC B (m)	0,60	93,92

FONTE: O autor (2014)

Na (TABELA 9) observa-se que o ETP do levantamento é menor que a IVT da Ordem 1a, e o levantamento também é classificado como PEC B altimétrico. O ETP do levantamento é menor que os apresentados pelos métodos de redução das sondagens batimétricas utilizando o Nível d'água RTK móvel, realizando observações a partir da embarcação.

TABELA 10 - AVALIAÇÃO DA IVT E DO PEC – NÍVEL DE REDUÇÃO DAS SONDAgens BATIMÉTRICAS OBTIDOS A PARTIR DO NÍVEL D'ÁGUA DA RÉGUA

SONDAgens BATIMÉTRICAS		Média* (m)	0,02	
Intersecções	905	Desvio Padrão* (m)	0,31	
Profundidade Média (m)	41,45	ETP (m)	0,62	Atende em (%):
Tolerância IHO		IVT Ordem 1a (m)	0,74	98,56
		IVT Ordem Especial (m)	0,40	77,24
* da diferença entre as sondagens regulares e de verificações		PEC A	0,50	87,96
		PEC B	0,60	93,81

FONTE: O autor (2014)

Na (TABELA 10) observa-se que o ETP do levantamento é menor que a IVT da Ordem 1a, e o levantamento também é classificado como PEC B altimétrico.

#### 4.1.1 Teste de hipóteses da diferença entre duas médias populacionais

Com os valores das médias e desvios padrões populacionais conhecidos (TABELA 8 a 10), aplicou-se o teste de hipóteses (equações 26 e 27):

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (26)$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \quad (27)$$

Onde:

$H_0$ : hipótese nula;

$H_1$ : hipótese alternativa;

$\mu_1$ : média populacional da amostra 1;

$\mu_2$ : média populacional da amostra 2.

Para o teste de hipóteses adotou-se um nível de significância de 5%. Como são conhecidos os desvios padrões populacionais utilizou-se a distribuição normal padronizada. O  $z_c$  é calculado por (equação 28):

$$z_c = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (28)$$

Onde:

$\bar{x}_1$  : média populacional da amostra 1;

$\bar{x}_2$ : média populacional da amostra 2;

$\sigma_1^2$ : variância populacional da amostra 1;

$\sigma_2^2$ : variância populacional da amostra 2;

$n_1$ : amostra 1;

$n_2$ : amostra 2.

Apresenta-se na (TABELA 11) os resultados do teste de hipótese.

TABELA 11- TESTE DE HIPÓTESES PARA DUAS MÉDIAS POPULACIONAIS

REDUÇÃO	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)	n	
Nível d'água Régua	0,02	0,31	905	
Nível d'água RTK Móvel	0,07	0,39		
Média Nível d'água RTK Estático	0,01	0,31		
TESTE	$\bar{x}_1 - \bar{x}_2$	$\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$	$z_c$	RESULTADO
Nível d'água RÉGUA - Nível d'água RTK Móvel	-0,05	0,02	-3,16	Rejeita-se $H_0$
Nível d'água Régua - Nível d'água RTK Estático	0,01	0,01	0,84	Não rejeita-se $H_0$
Nível d'água RTK Móvel - Nível d'água RTK Estático	0,06	0,02	3,91	Rejeita-se $H_0$

FONTE: O autor (2014)

Na (TABELA 11) observa-se que para um nível de confiança de 95% as médias, das IVT dos métodos de redução ao nível' água instantâneo com RTK Estático e régua linimétrica, são equivalentes.

#### 4.2 ANÁLISE DAS DIFERENÇAS DOS MDTs OBTIDOS PELO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO DA VIZINHANÇA NATURAL

Para avaliar as diferenças entre o fundo do reservatório obtido inicialmente com a levantamento Laser e posteriormente com levantamento batimétrico foram geradas as superfícies do fundo do reservatório pelo método



da Vizinhança Natural, estrutura de dados matricial gerando-se uma imagem hipsométrica com resolução de 2 m no terreno. Com estes dados obteve-se a partir da equação 29 uma imagem que representa a diferença entre o levantamento batimétrico realizado em setembro de 2014 a época de referência (levantamento Laser).

$$\textit{Minus} = \textit{Raster 1} - \textit{Raster 2} \quad (29)$$

Onde:

*Minus*: imagem da subtração;

*Raster 1*: imagem do fundo do reservatório obtido pelo levantamento batimétrico;

*Raster 2*: imagem do fundo do reservatório obtido pelo levantamento Laser.

A subtração das imagens foi realizada para os três métodos aplicados na redução das sondagens batimétricas citados anteriormente, sendo que o modelo obtido pelo levantamento Laser foi adotado como referência (*Raster 2*). Os resultados obtidos são apresentados nas (FIGURA 18 a 20) a seguir.

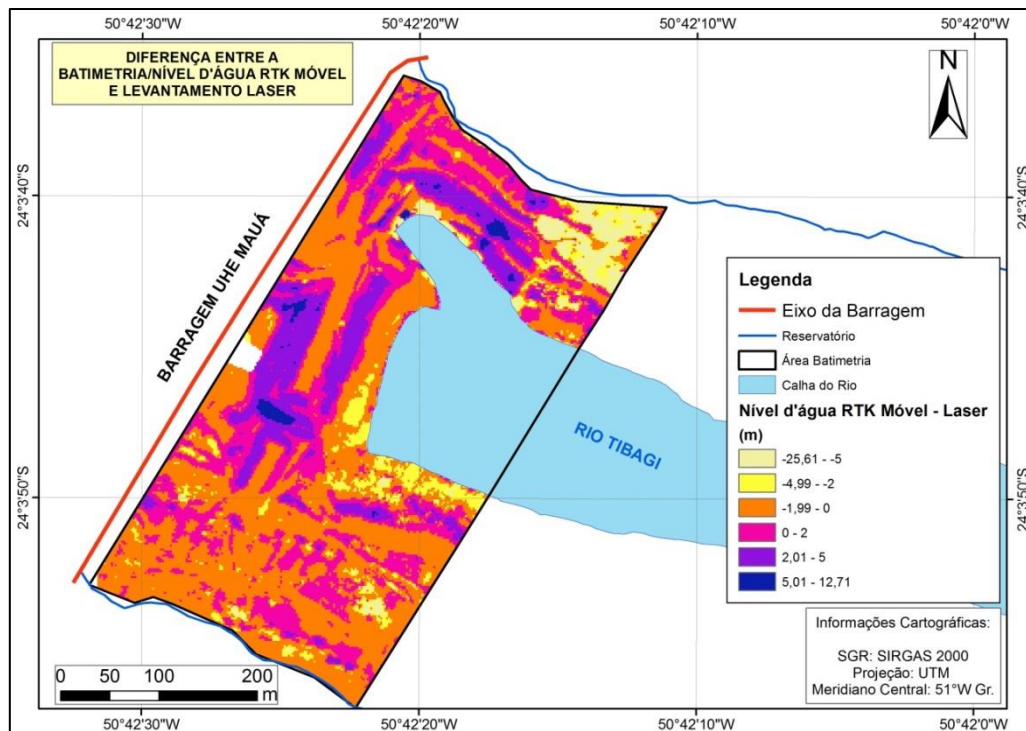


FIGURA 18 - DIFERENÇA ENTRE AS SONDAgens BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

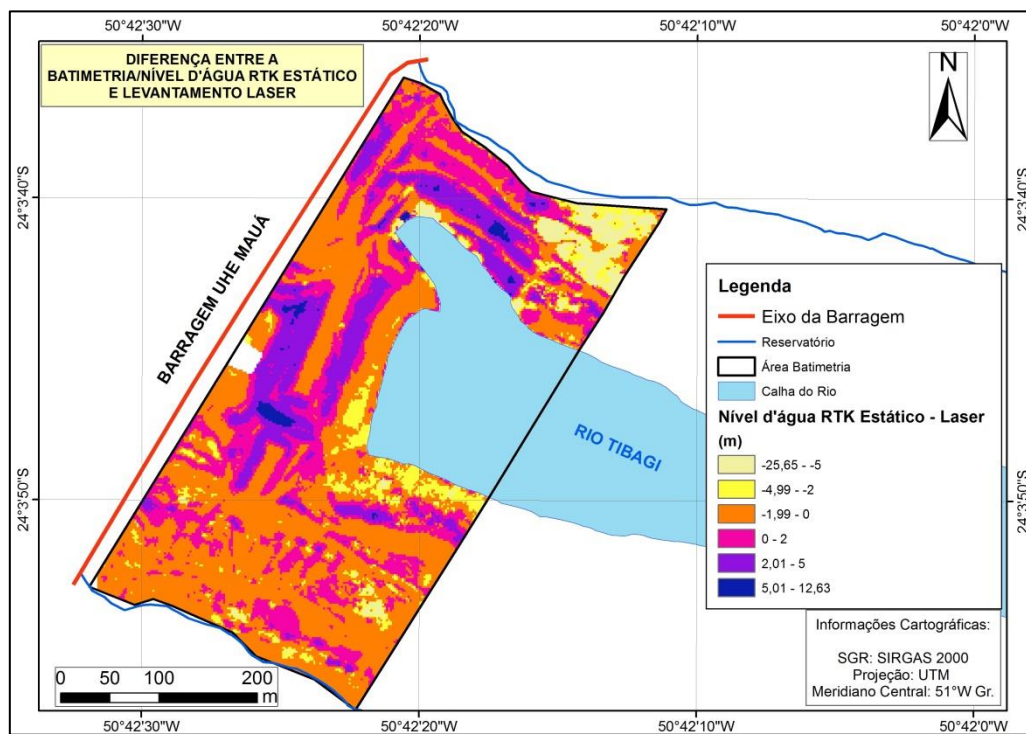


FIGURA 19 - DIFERENÇA ENTRE AS SONDAgens BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

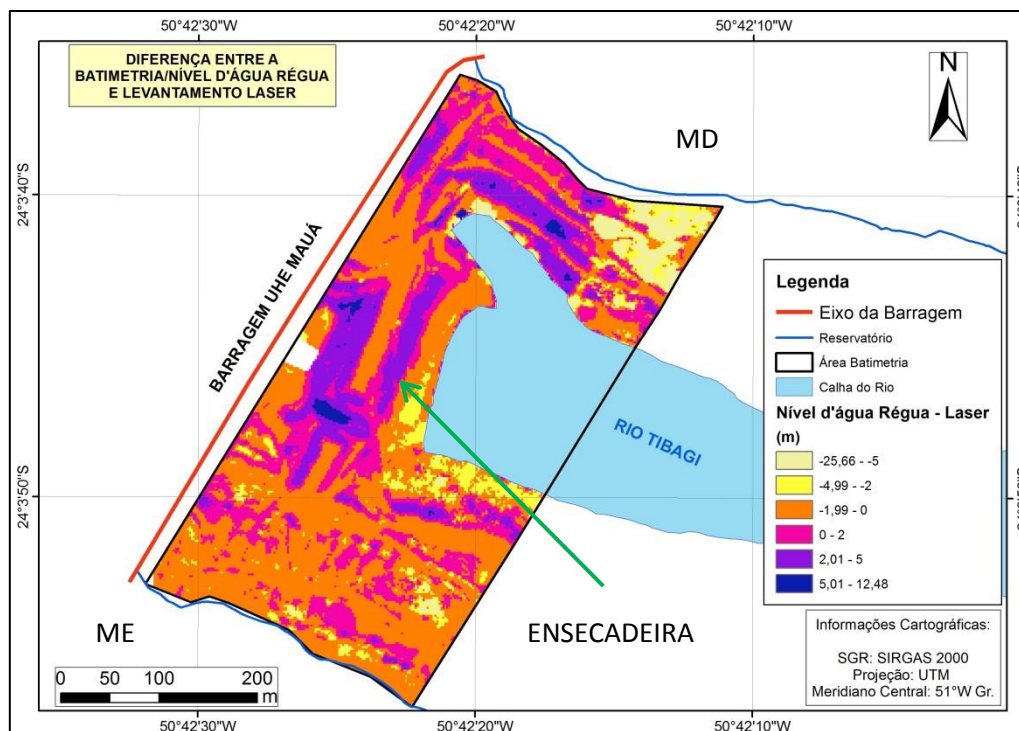


FIGURA 20 - DIFERENÇA ENTRE AS SONDAJENS BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

As (FIGURA 18 a 20) representam as diferenças em metros entre a situação do fundo antes do enchimento do reservatório, levantamento Laser (Superfície de Referência), e após o enchimento obtido pelo levantamento batimétrico. As diferenças negativas representam locais em que o fundo do lago obtido pela batimetria estão abaixo do fundo do reservatório levantado pelo levantamento Laser, e os valores positivos demonstram a situação contrária. As diferenças obtidas por cada método de redução das sondagens batimétricas são imperceptíveis em uma análise visual.

Na (FIGURA 18) o método adotado para a redução das sondagens batimétricas com relação ao nível de redução (Nível d'água instantâneo) foi obtido pelo RTK móvel. Na (FIGURA 19) pelo RTK estático e na (FIGURA 20) pela régua linimétrica. Observa-se nas três figuras que próximo às margens do reservatório, antiga margem do rio Tibagi, as diferenças se concentram entre 0 e 2m (cores laranja e rosa), tanto positivas quanto negativas. No quadrante entre as latitudes 24°03'50"S e 24°03'40"S, longitudes 50°42'30"W e 50°42'20"W, região da ensecadeira, antes do enchimento do lago, as

diferenças estão entre  $-2$  e  $5$ m. Na margem direita (MD) a nordeste (NE) observa-se uma região com diferenças entre as superfícies de até  $-25,67$ m. Em uma análise visual (FIGURA 11 comparada as FIGURA 18, 19 e 20) verifica-se que os locais com maiores diferenças a NE na MD do lago (cor amarela nas FIGURA 18, 19 e 20) existe a presença de vegetação arbórea. Estas diferenças são observadas na (FIGURA 21), onde sobrepõem-se o gráfico de diferenças de profundidade (usando os dados batimétricos reduzidos ao nível d'água RKT estático) com a imagem da época do levantamento Laser.

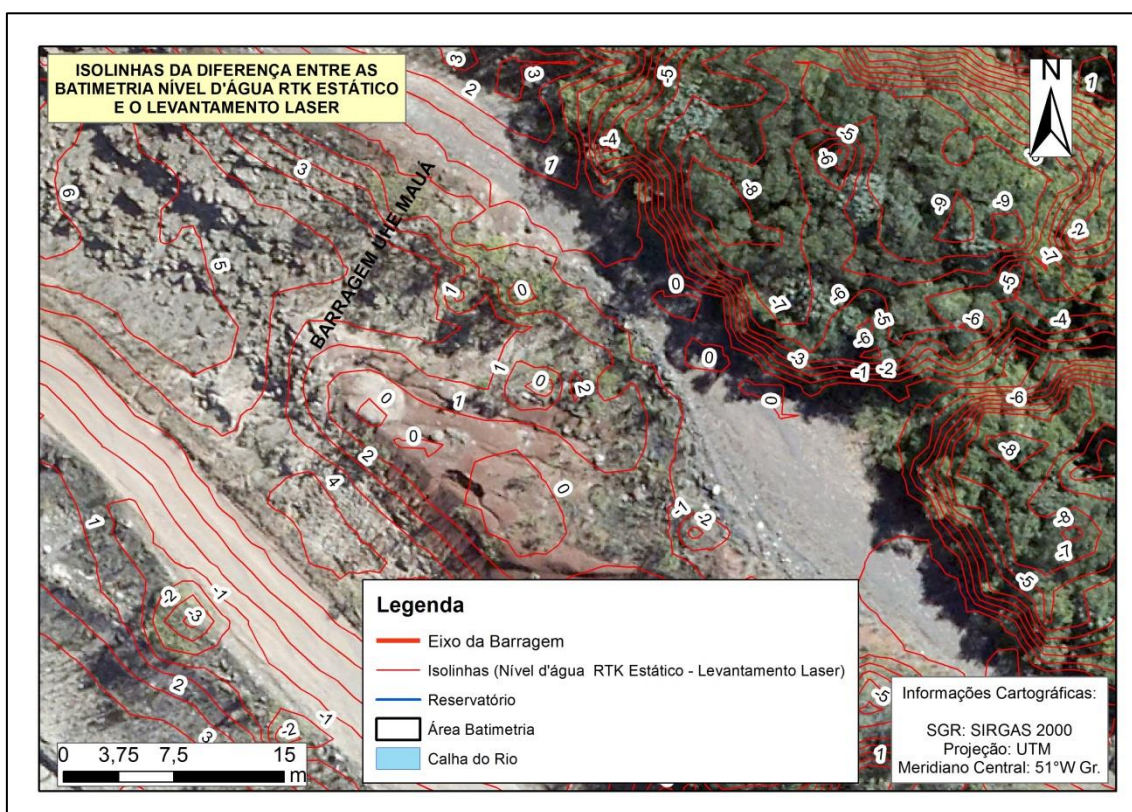


FIGURA 21 - ISOLINHAS DA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/ NÍVEL D'ÁGUA RKT ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

Na (FIGURA 21) observa-se que nos locais que o fundo do reservatório antes do enchimento era coberto por vegetação, as diferenças são maiores que nos locais sem presença de vegetação, exceto em locais isolados. Nas regiões que haviam vegetação o fundo do reservatório determinado pela levantamento Laser ficou acima do fundo do lago obtido pelos levantamento batimétricos.



Com intuito de analisar os valores das diferenças entre a SR e os MDTs do levantamento batimétrico foi feita uma classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança para obter as classes de uso do solo. Para realizar a classificação foram selecionadas 34 amostras (FIGURA 22) e com isso obter suas respectivas assinaturas espectrais.

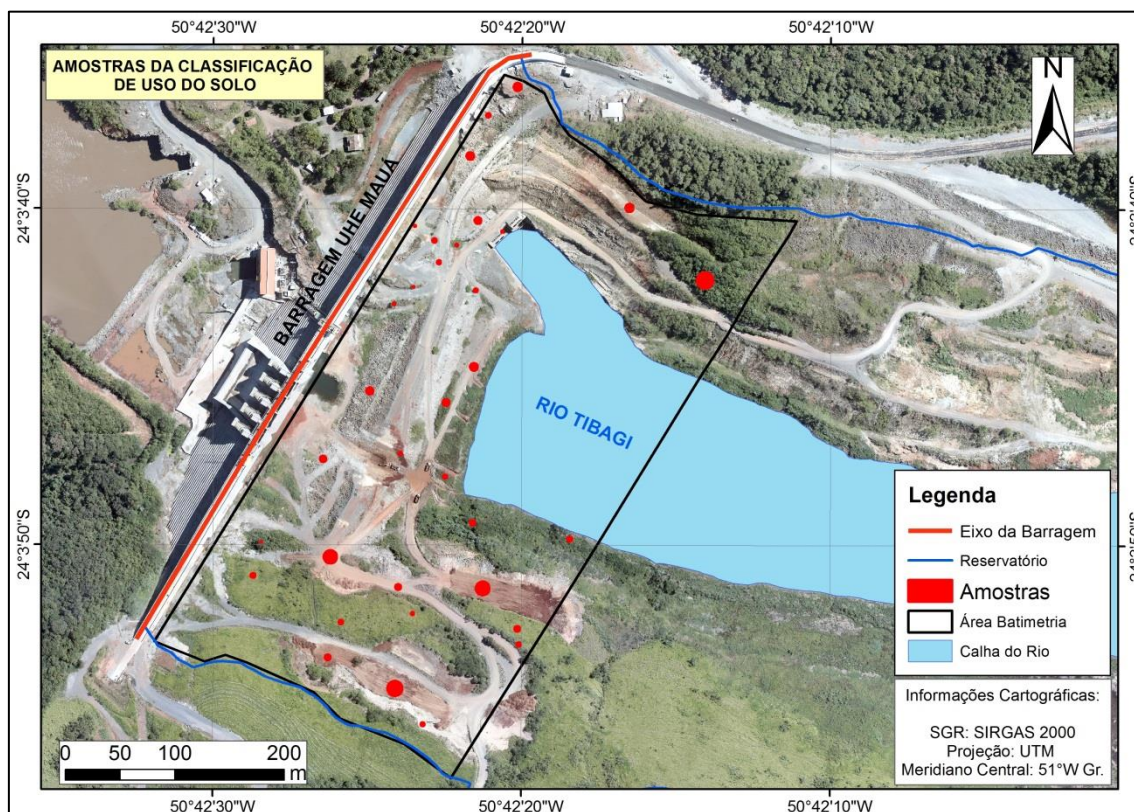


FIGURA 22 - AMOSTRAS PARA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DO USO DO SOLO

FONTE: O autor (2014)

As amostras foram distribuídas aleatoriamente pela área de estudo, e agregam 7 classes, são elas: brita, cascalho, pasto, rochas, solo exposto, mato, pasto e sombra. A imagem aérea contém somente as bandas *red*, *green* e *blue* (RGB) do espectro visível eletromagnético. O resultado da classificação é apresentado na (FIGURA 23). A classe sombra foi definida com objetivo de não ocorrer classificações equivocadas, por exemplo, classificar vegetação como solo exposto.

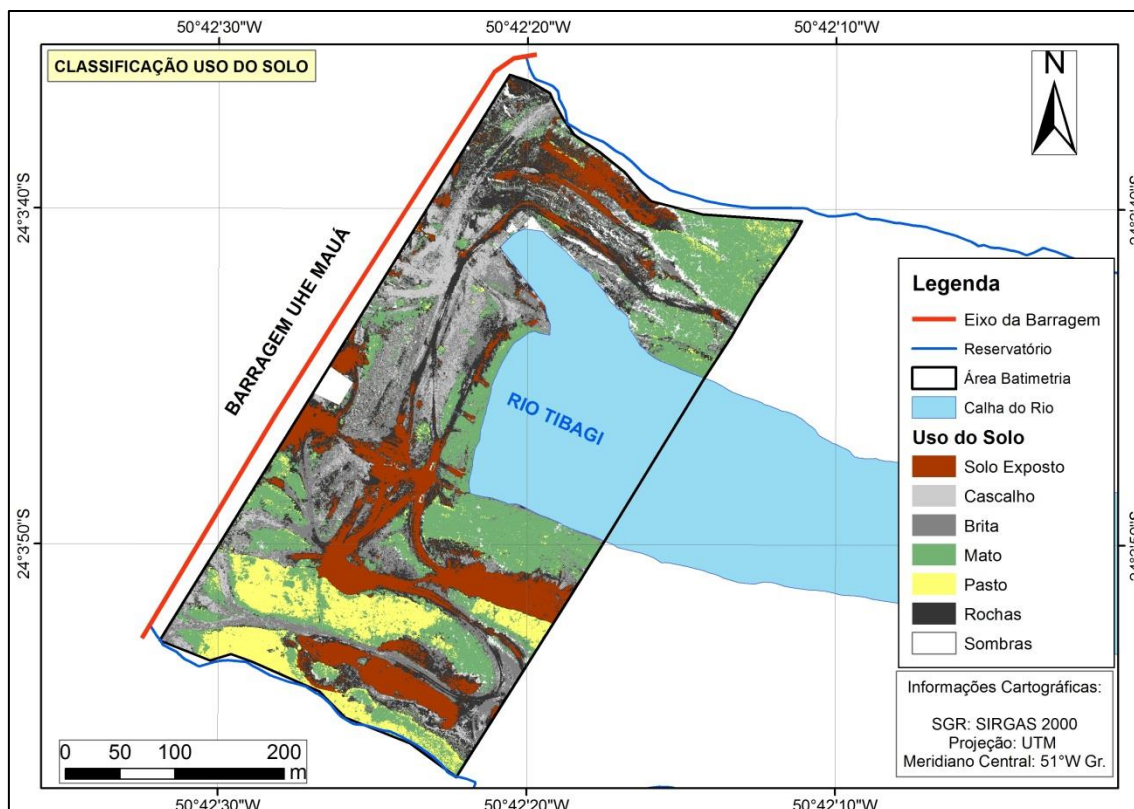


FIGURA 23 - MAPA DE USO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO

FONTE: O autor (2014)

Com as camadas de uso do solo e das diferenças entre o levantamento batimétrico e aerofotogramétrico executou-se a sobreposição dos *layers* para verificar se o tipo de cobertura do solo está relacionado as diferenças entre a SR e as superfícies provenientes do levantamento batimétrico, conforme observado na (FIGURA 21). Os resultados obtidos são apresentados nas (FIGURA 24 a 26) a seguir.

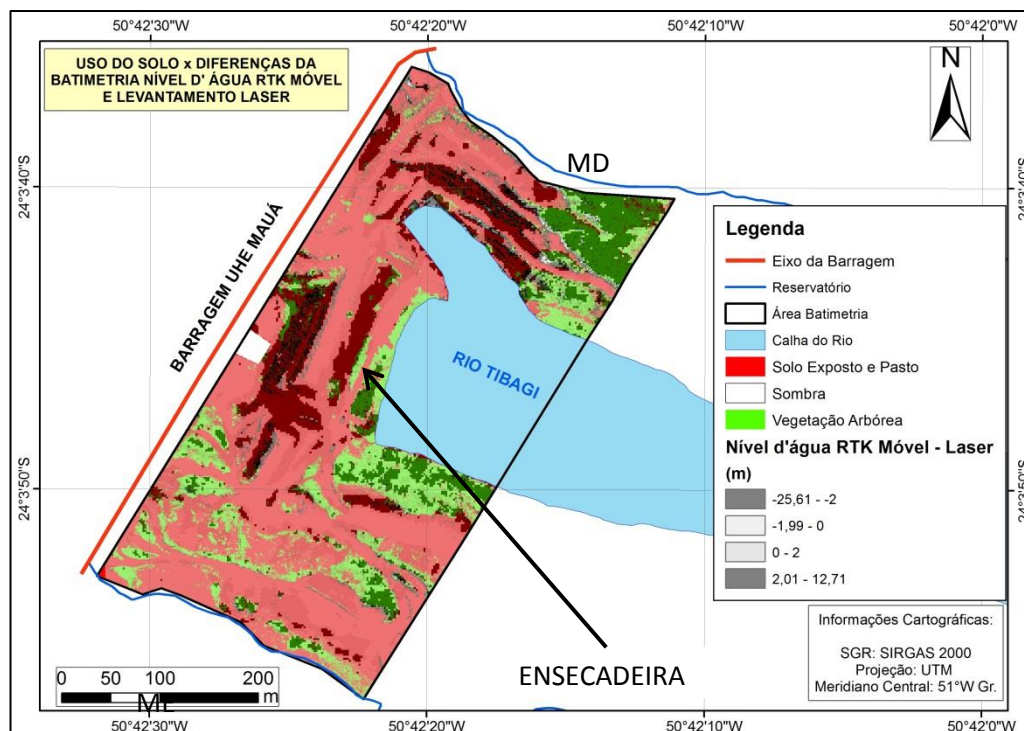


FIGURA 24 - SOBREPOSIÇÃO DAS CAMADAS USO DO SOLO E DIFERENÇA ENTRE BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

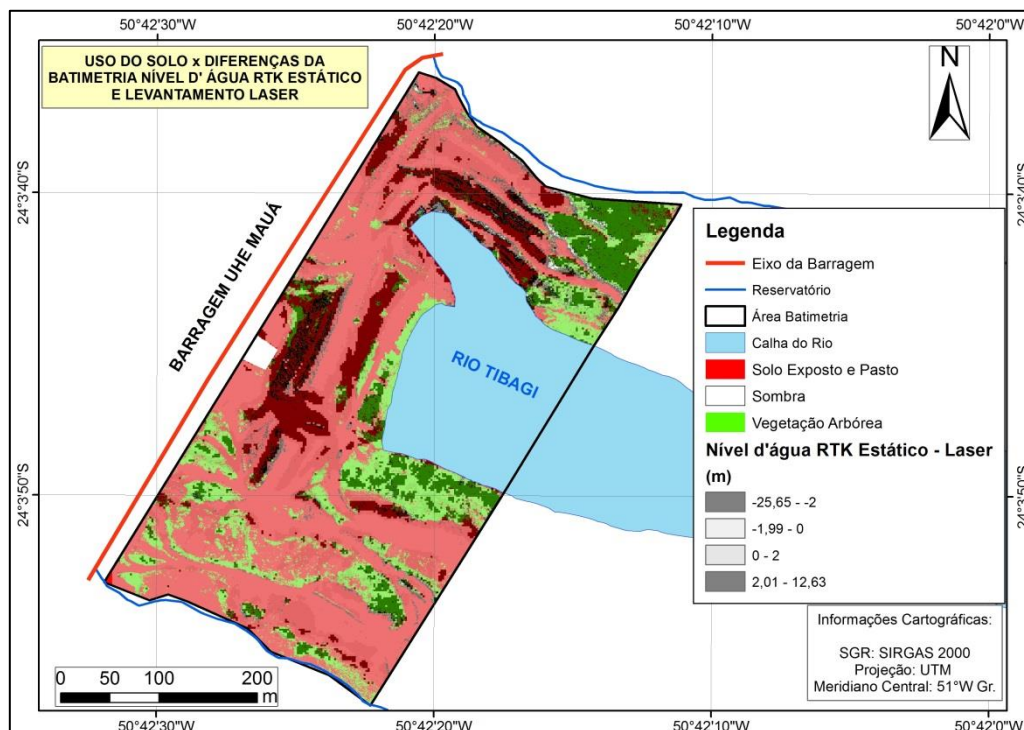


FIGURA 25 - SOBREPOSIÇÃO DAS CAMADAS USO DO SOLO E DIFERENÇA ENTRE BATIMETRIA/NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)



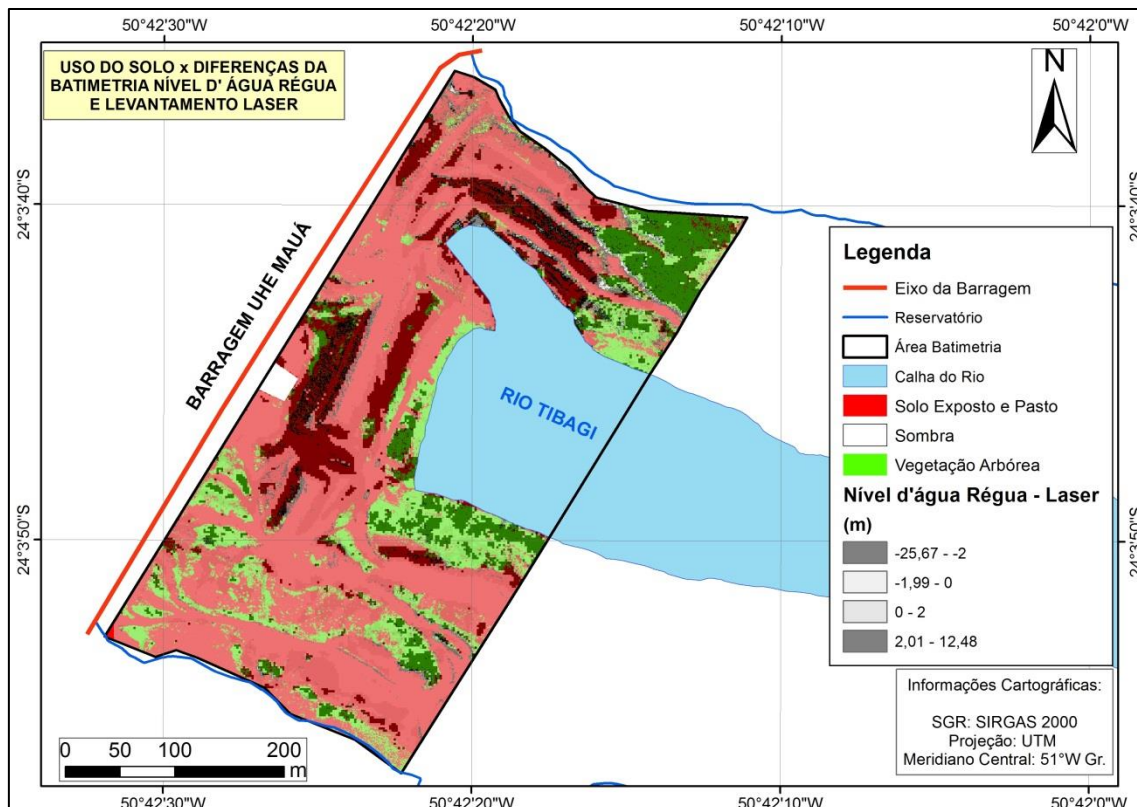


FIGURA 26 - SOBREPOSIÇÃO DAS CAMADAS USO DO SOLO E DIFERENÇA ENTRE BATIMETRIA/NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

Para facilitar a análise visual das diferenças entre a batimetria e o levantamento Laser com relação ao uso e ocupação do solo, foi feita uma reclassificação do uso solo em três classes, são estas: solo exposto e pasto (agrega solo exposto, pasto, rochas, cascalho e brita), vegetação arbórea e sombra (sem informação). As imagens com as diferenças da batimetria em relação a SR obtida por aerofotogrametria foi reclassificada em quatro classes. Nas (FIGURA 24 a 26) os tons de cores mais escuros representam as maiores diferenças entre a batimetria e a fotogrametria, enquanto os tons de cores mais claros representam as menores diferenças. Analisando as margens do antigo curso d'água do rio Tibagi, onde as alterações do fundo deveriam ser menores que na região da enseadeira, percebe-se diferenças superiores a 2m de variação na margem direita tanto nas regiões com vegetação e também com solo exposto. Na região da enseadeira apresentou diferenças superiores a 2 m de variação que deve estar vinculada movimentação de sedimentos.



### 4.3 AVALIAÇÃO DO ASSOREAMENTO

O volume assoreado para área de interesse foi calculado através da diferença entre os MDTs obtidos do levantamento Laser e do levantamento batimétrico. Neste foram gerados três MDTs diferentes obtidos a partir da redução das sondagens batimétricas pelos métodos descritos no item 3.3.4.

Para determinar o volume assoreado na área de estudo utilizou-se a ferramenta *Surface Difference* da extensão *3D Analyst* do ARCGIS 10.1. Através dela é possível calcular a diferença volumétrica entre duas superfícies TIN ou dados de terreno (ESRI, 2014). Nas (FIGURA 27 a 29) são apresentadas as diferenças entre a SR, obtida do levantamento Laser, e as superfícies determinadas pelas sondagens batimétricas.

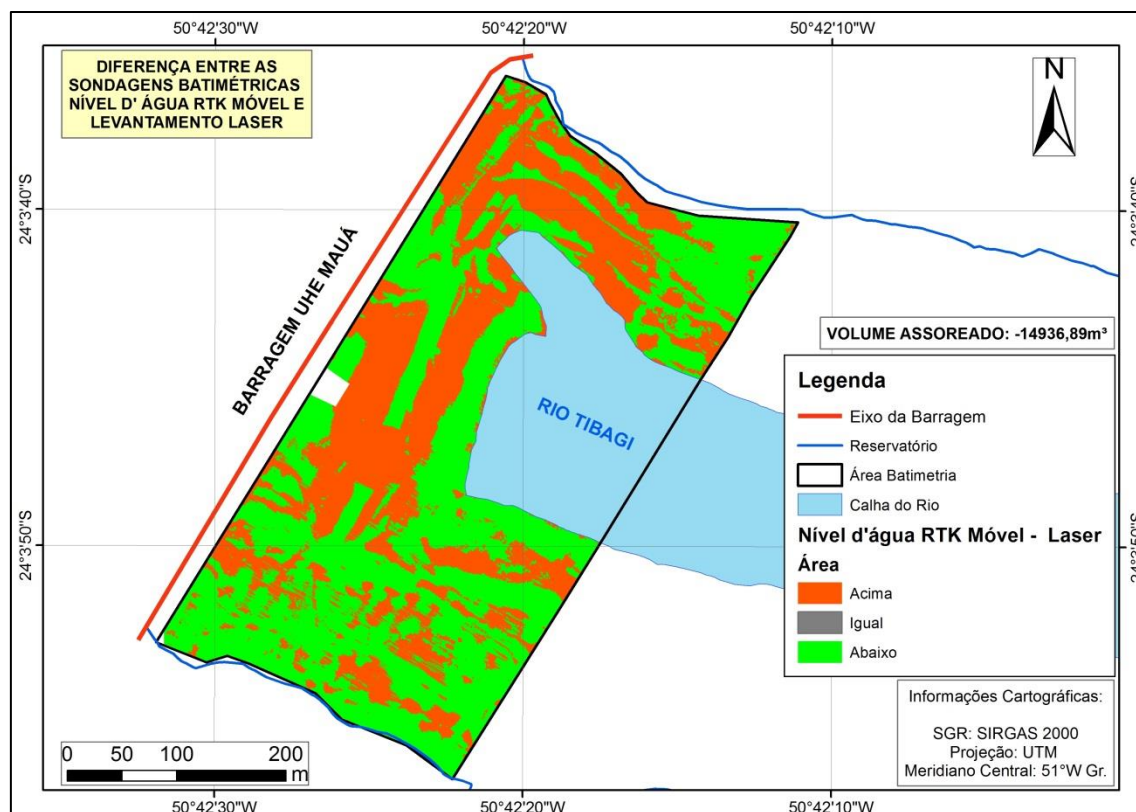


FIGURA 27 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME ASSOREADO OBTIDO PELA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAGENS BATIMÉTRICAS/NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

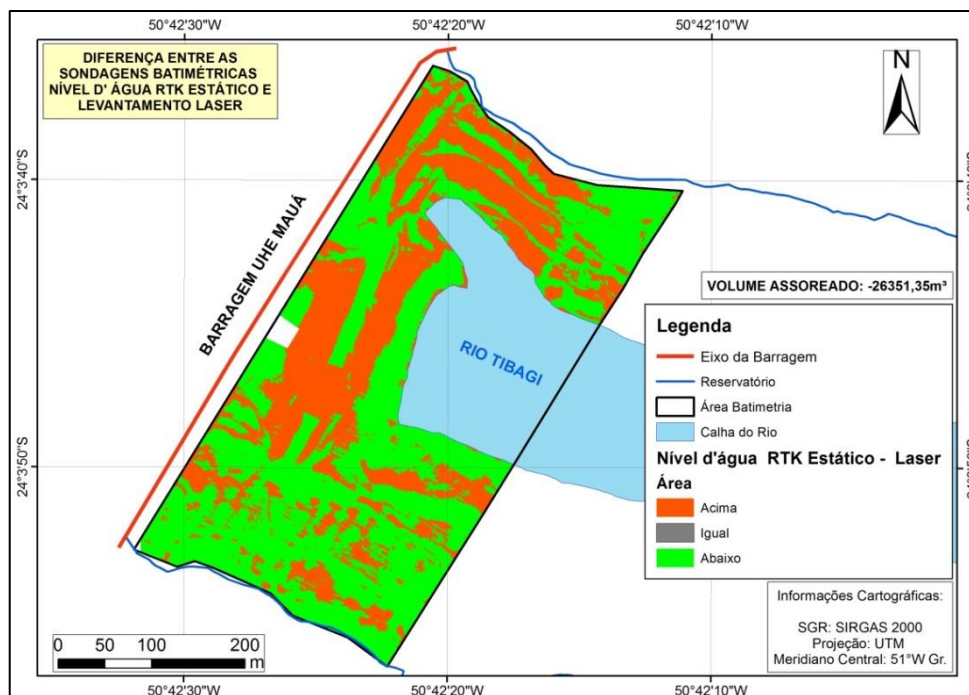


FIGURA 28 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME ASSOREADO OBTIDO PELA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAENS BATIMÉTRICAS/NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

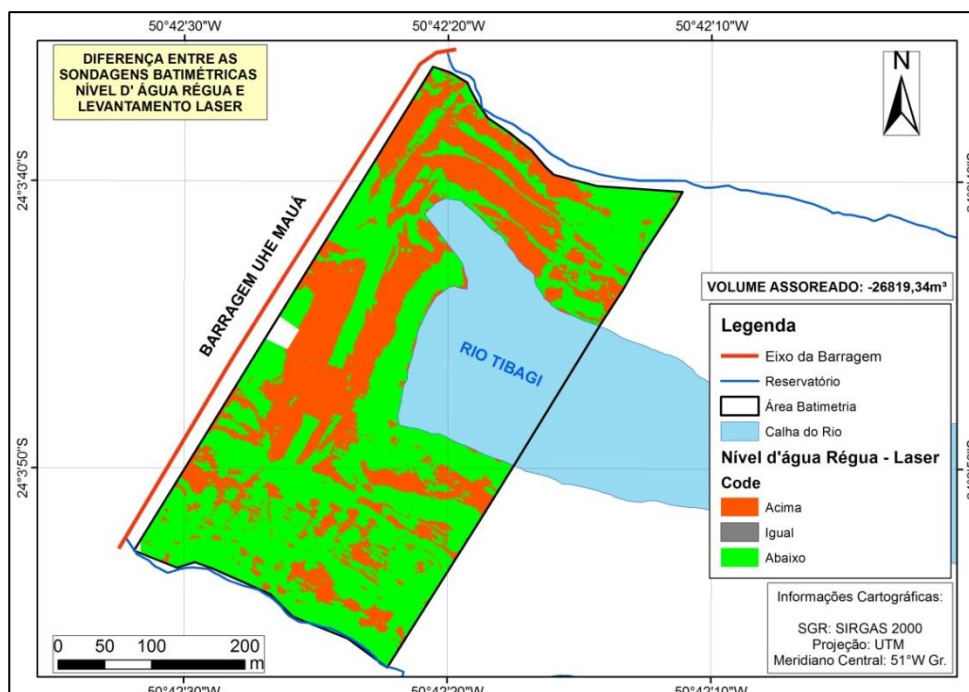


FIGURA 29 - DETERMINAÇÃO DO VOLUME ASSOREADO OBTIDO PELA DIFERENÇA ENTRE AS SONDAENS BATIMÉTRICAS/NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

A diferença entre as superfícies é realizada comparando geometricamente os triângulos das mesmas. A classificação acima, igual e abaixo é feita com relação a superfície de referência. Isto é, valores positivos representam regiões que a superfície 1 apresenta elevações superiores a superfície 2 (referência), valores negativos a superfície 1 está abaixo da superfície de referência e valores nulos representam áreas que as duas superfícies são coincidentes (ESRI, 2014).

Analizando as (FIGURA 27 a 29) e os volumes assoreados obtidos pelos diferentes métodos de redução das sondagens batimétricas percebe-se que na área de estudo houve um aumento do volume útil do reservatório, isto é, a superfície de referência (março de 2012) ficou acima da superfície levantada em setembro de 2014. Esta diferença em algumas regiões pode estar atrelada a presença de árvores, na época de realização da cobertura aérea, e consequentemente a elevação obtida pelo levantamento Laser não representa a altitude elipsóidica do solo (fundo do reservatório).

Os volumes assoreados foram  $-26351,35 \text{ m}^3$  para a redução das sondagens batimétricas utilizando o nível d'água obtido pelo RTK Estático,  $-26819,34 \text{ m}^3$  para a redução das sondagens batimétricas ao nível d'água obtido pela régua linimétrica (telemétrica) instalada na barragem e  $-14936,89 \text{ m}^3$  para a redução das sondagens calculadas considerando o nível d'água coletado pelo RTK Móvel (instalado no barco). A diferença de volume entre os métodos de redução ao nível d'água determinados pelo RTK Estático e pela régua linimétrica corresponde a  $467,99 \text{ m}^3$ . Enquanto que a diferença de volume entre o Nível d'água RTK ESTÁTICO e o Nível d'água Régua é de  $11414,46 \text{ m}^3$  e  $11882,45 \text{ m}^3$  respectivamente, quando comparado ao Nível d'água RTK Móvel. Esta diferença deve-se ao fato de a antena GNSS sofrer oscilações na trajetória do barco sobre as linhas de sondagens, provocada pelo vento, manobras e pela velocidade da plataforma não ser constante.

A inclinação do fundo do lago antes e após o seu enchimento podem ser visualizadas em mapas de declividade, conforme (FIGURA 30 a 33). E nas (FIGURA 34 a 36) são apresentadas as diferenças de declividades antes e após o enchimento do lago.

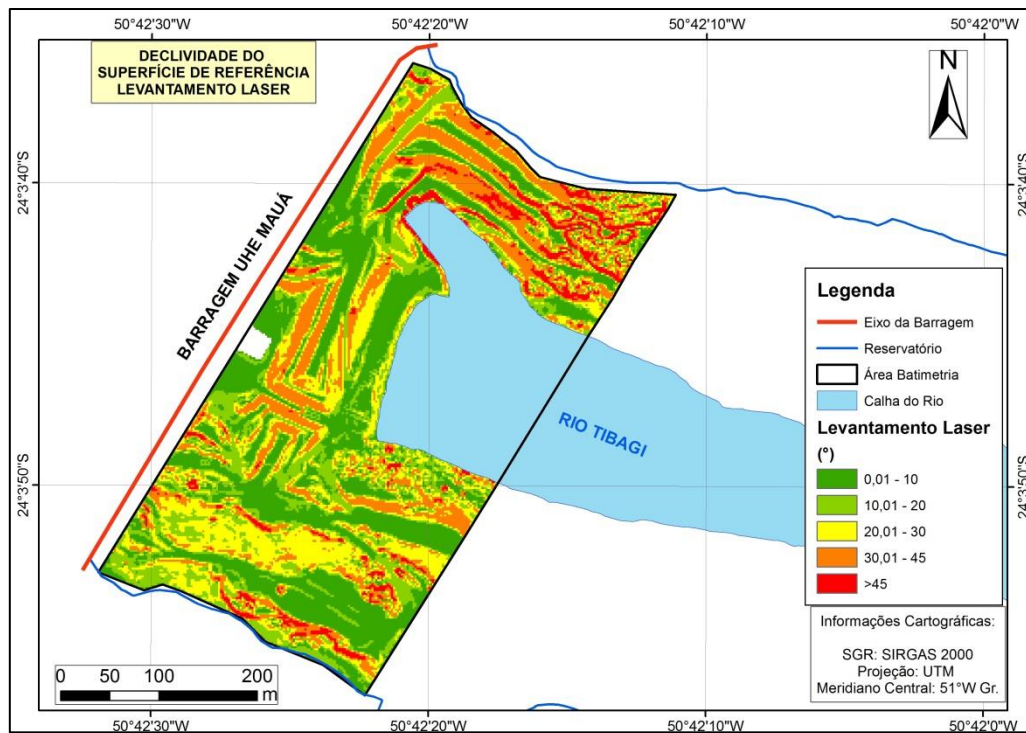


FIGURA 30 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

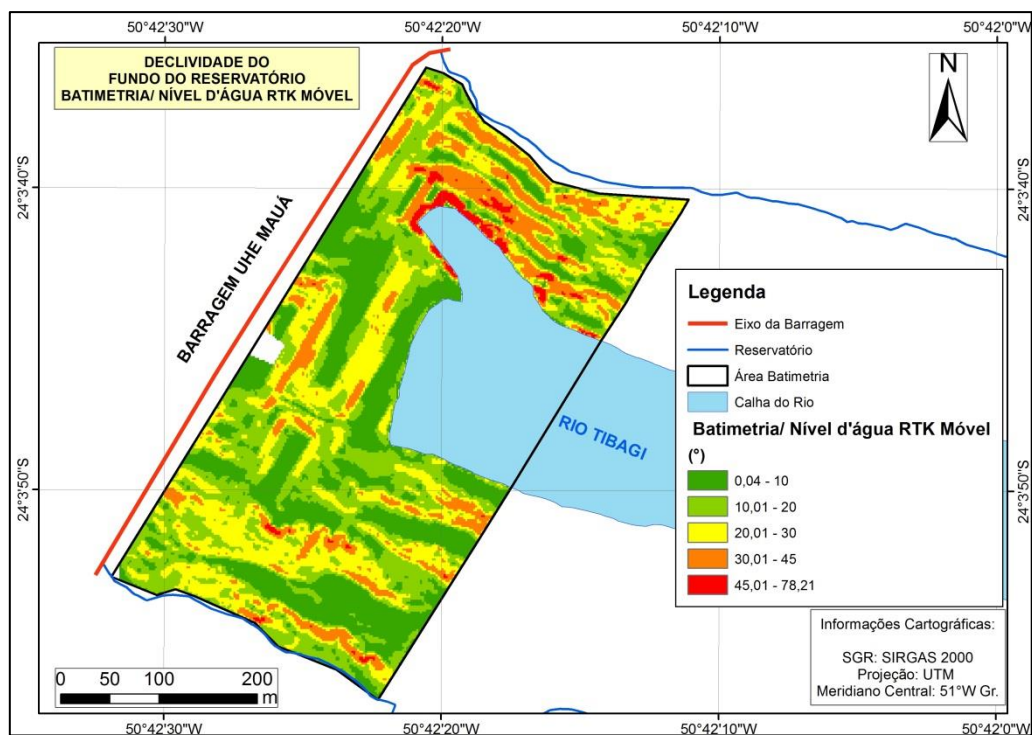


FIGURA 31 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO/NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL

FONTE: O autor (2014)



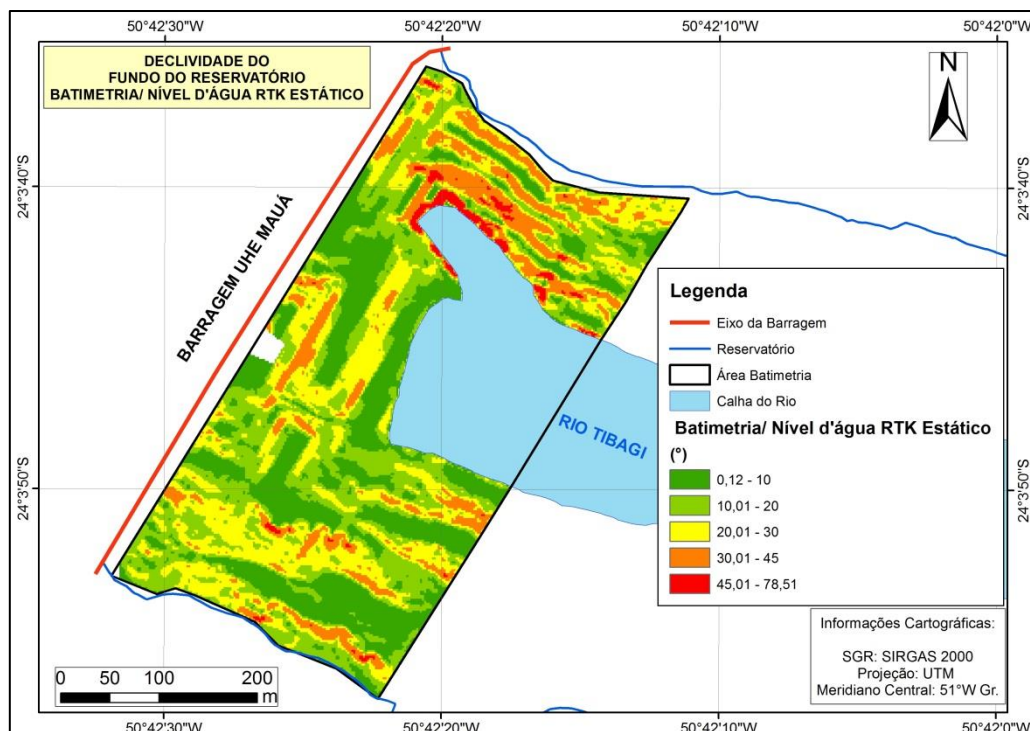


FIGURA 32 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO

FONTE: O autor (2014)

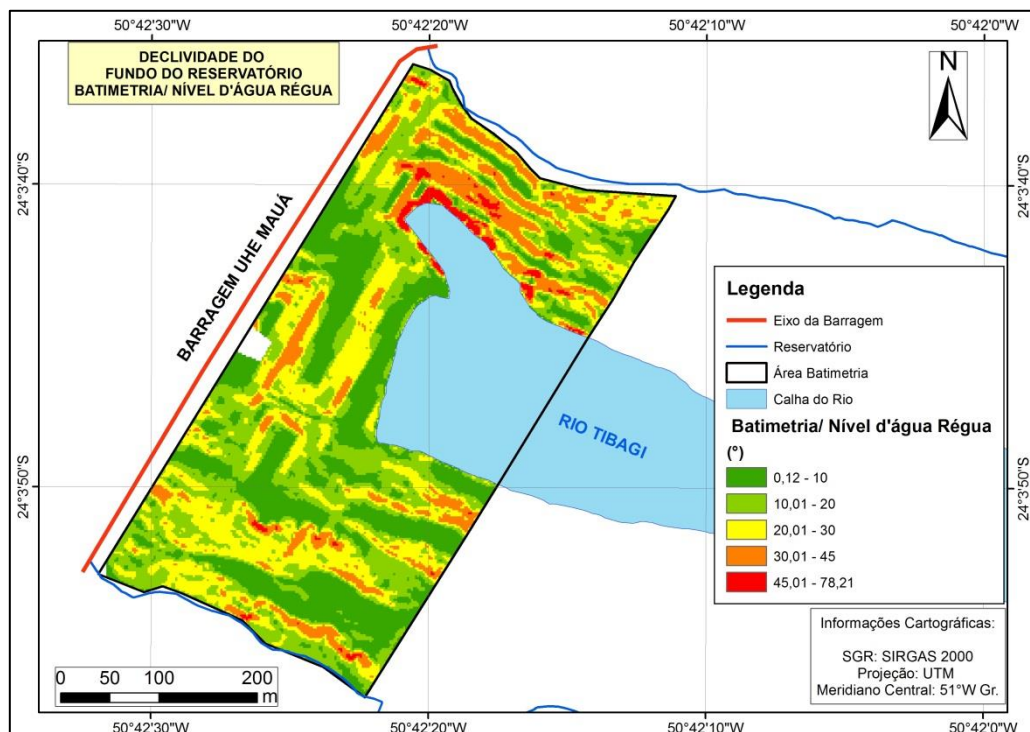


FIGURA 33 - MAPA DE DECLIVIDADE DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA

FONTE: O autor (2014)

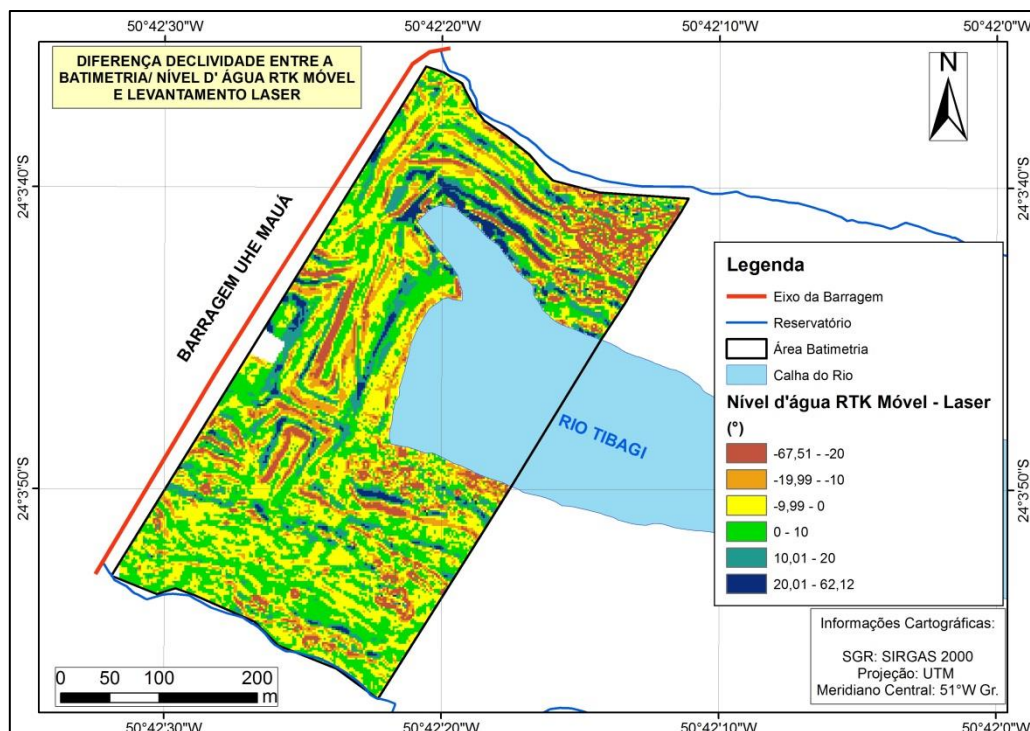


FIGURA 34 - MAPA DA DIFERENÇA DE DECLIVIDADE ENTRE A BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

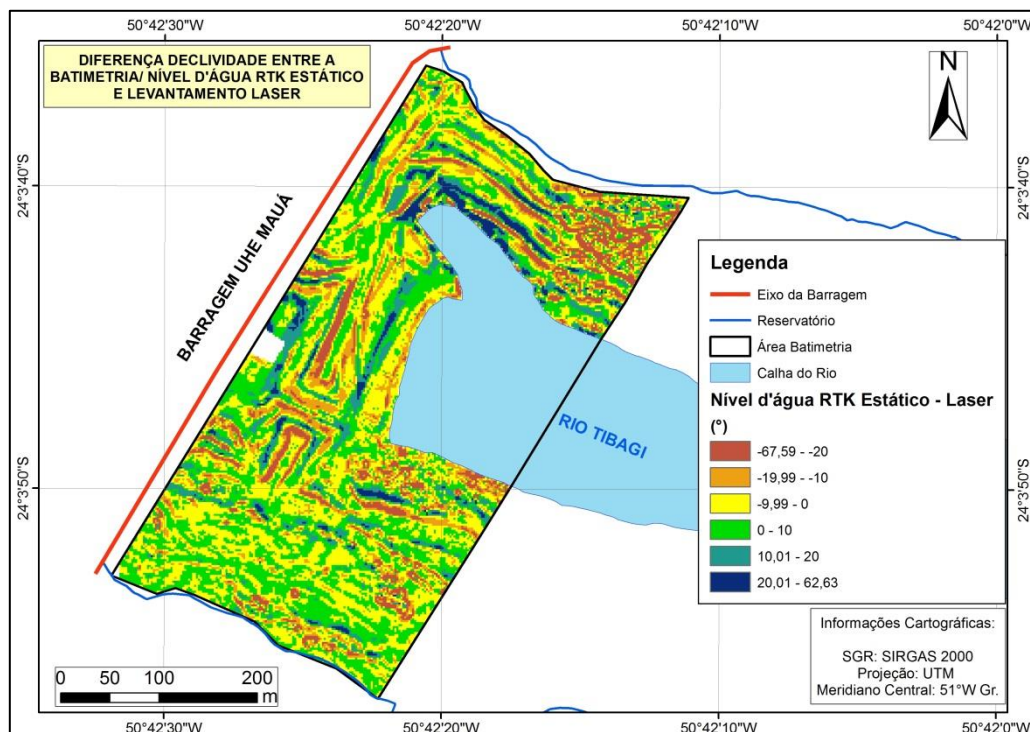


FIGURA 35 - MAPA DA DIFERENÇA DE DECLIVIDADE ENTRE A BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

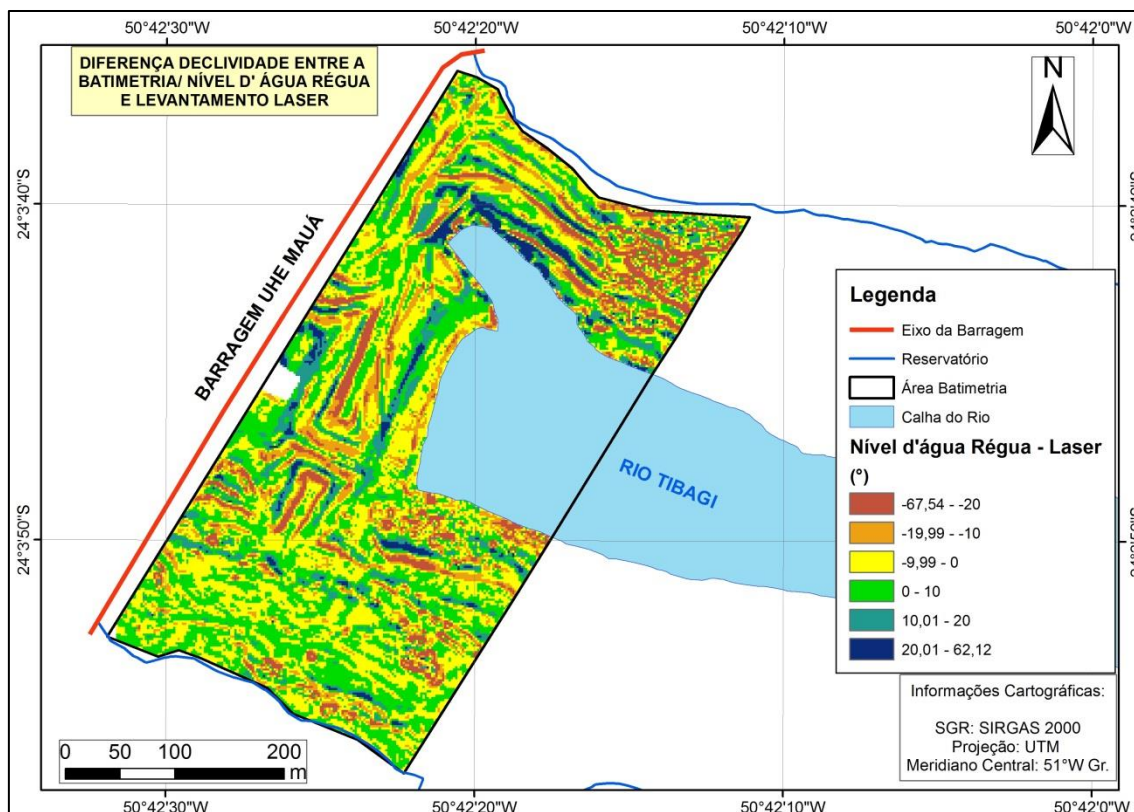


FIGURA 36 - MAPA DA DIFERENÇA DE DECLIVIDADE ENTRE A BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E O LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

Nos mapas de declividades das (FIGURA 30 a 33) observa-se se uma suavização da superfície do fundo do reservatório após o enchimento do mesmo. Nas (FIGURA 34 a 36) esta suavização pode ser observada pelos valores negativos da diferença entre declividade, isto é a declividade do fundo do levantamento batimétrico é inferior à declividade da época de referência (levantamento Laser).

O intervalo entre as duas coletas de dados é de 2 anos e 6 meses, e a UHE Mauá entrou em operação comercial em dezembro de 2012. Esperava-se que neste momento próximo ao eixo da barragem o assoreamento fosse relativamente pequeno, pois a formação do reservatório é recente, porém ocorreram alterações no leito do reservatório durante o enchimento do lago.

As diferenças tridimensionais do fundo do reservatório para as duas épocas de coleta de dados podem ser visualizadas nas (FIGURA 37 a 39) à seguir. As áreas que o MDT gerado pelo levantamento batimétrico estão acima



do MDT do levantamento Laser é representado pela cor amarela, e quando o MDT do levantamento Laser está acima apresentam-se na cor vermelha, conforme legenda.

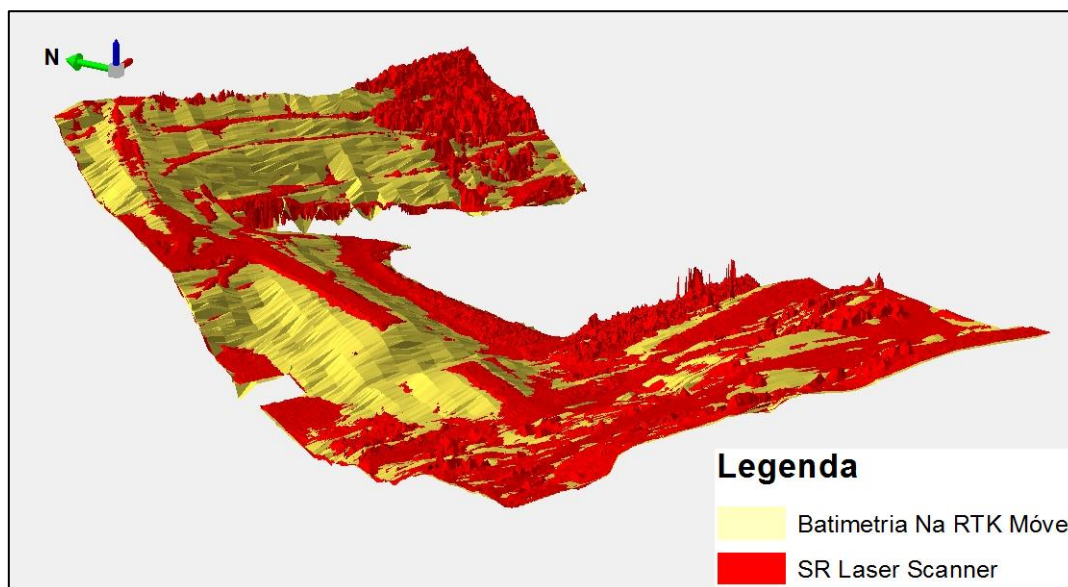


FIGURA 37 - MODELO 3D DA SOBREPOSIÇÃO DA BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK MÓVEL E DO LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

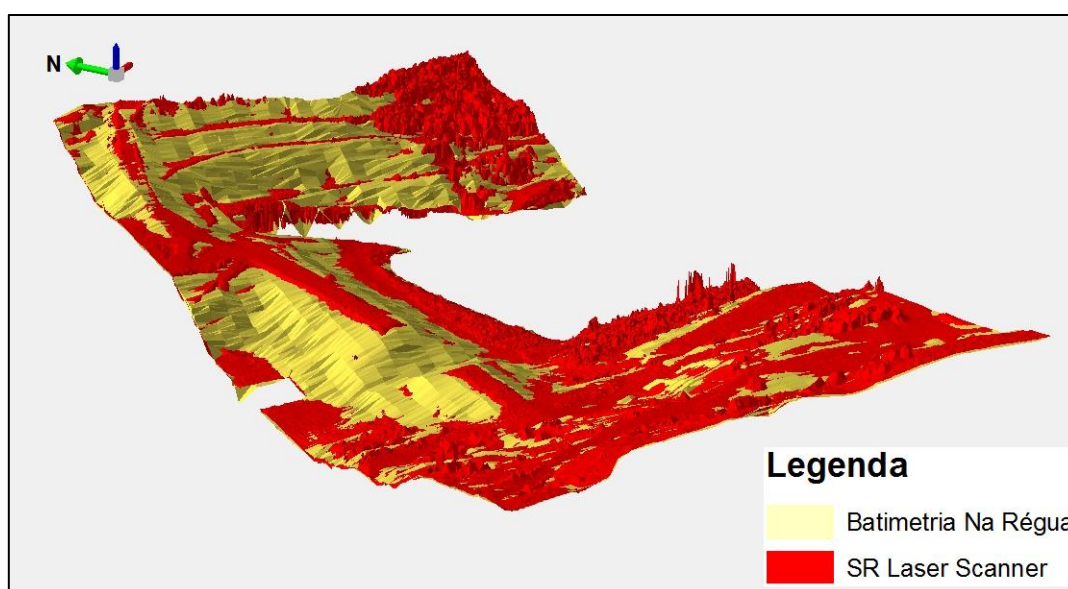


FIGURA 38 - MODELO 3D DA SOBREPOSIÇÃO DA BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RTK ESTÁTICO E DO LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)



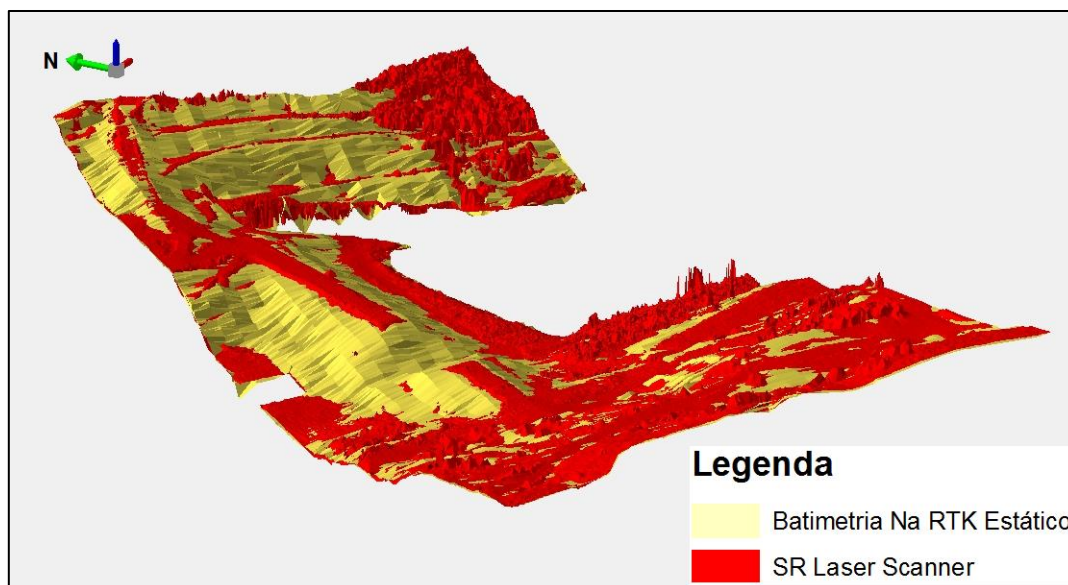


FIGURA 39 - MODELO 3D DA SOBREPOSIÇÃO DA BATIMETRIA/ NÍVEL D'ÁGUA RÉGUA LINIMÉTRICA E DO LEVANTAMENTO LASER

FONTE: O autor (2014)

Nas (FIGURA 37 a 39) é possível visualizar os locais que o levantamento Laser está acima da batimetria e vice versa, observa-se novamente que na margem esquerda a nordeste a vegetação prejudicou a definição do fundo quando utilizado os dados do Laser para gerar o MDT. O efeito da vegetação poderia ser eliminado utilizando-se o segundo retorno do pulso Laser.

#### 4.4 RESUMO METODOLOGIA ADOTADA PARA MONITORAMENTO DO ASSOREAMENTO

Para realizar o monitoramento do assoreamento do reservatório da UHE Mauá executou-se as seguintes etapas:

- 1) Realizou-se antes do enchimento do reservatório o levantamento Laser da área de interesse, as ortofotocartas foram elaboradas na escala 1: 1.000 e as curvas de níveis foram representadas com equidistância de 1m. Também foi obtido nesta etapa o MDT do fundo do reservatório das

margens do rio Tibagi, desconsiderando a calha do rio (antes do enchimento).

- 2) Planejamento das sondagens batimétricas. Considerou-se para as sondagens regulares, transversais ao curso d'água o espaçamento de 1 cm na escala das ortofotocartas, gerada no levantamento Laser, e corresponde a um espaçamento de 10 m. as sondagens de verificações foram executadas considerando um espaçamento de 50 m.
- 3) Execução do levantamento batimétrico:
  - a) Teste de latência realizado no reservatório de Capivari, UHE Governado Parigot de Souza;
  - b) No início e no final de cada dia de levantamento foi levantado com RTK o nível d'água instantâneo com o equipamento instalado na margem direita do reservatório.
- 4) Processamento dos dados:
  - a) No software Hypack realizou-se o processamento das sondagens e a eliminação de erros grosseiros provenientes das medições de posição e profundidade, através da análise dos perfis do fundo do reservatório;
  - b) Redução das sondagens batimétricas considerando os valores do nível d'água instantâneo observados pelo RTK instalado no barco;
  - c) Redução das sondagens batimétricas considerando os valores do nível d'água instantâneo observados com RTK instalado na margem do reservatório, rastreo realizado no início e final de cada dia de levantamento. Os valores do nível d'água instantâneo foi interpolado linearmente a partir das observações realizadas;
  - d) Redução das sondagens batimétricas ao nível d'água instantâneo observados pela régua linimétrica instalada no corpo da

barragem. A coleta de dados é feita de modo automático a cada 15 min. As leituras feitas pela régua foram obtidas no site do SIMEPAR.

- 5) Avaliação das Incertezas Verticais Totais (IVT) do levantamento batimétrico realizado. Nesta etapa foram utilizadas as intersecções entre as sondagens regulares, transversais ao curso d'água, e as sondagens de verificações, perpendiculares as linhas regulares e longitudinais ao curso d'água.
- 6) Geração das imagens hipsométricas do fundo do reservatório obtidas pelo:
  - a) Levantamento Laser;
  - b) Batimetria, sondagens batimétricas reduzidas ao nível d'água instantâneo levantados com RTK móvel (receptor/antena instalado no barco);
  - c) Batimetria, sondagens batimétricas reduzidas ao nível d'água instantâneo levantados com RTK estático (receptor/antena instalado na margem do reservatório);
  - d) Batimetria, sondagens batimétricas reduzidas ao nível d'água instantâneo levantados com régua linimétrica.
- 7) Análise das diferenças entre as imagens hipsométricas, oriundas do levantamento batimétrico, com relação a imagem obtida do levantamento Laser. Identificação de locais que as diferenças de elevações do fundo não representam o assoreamento.
- 8) Geração do mapa de uso do solo, a partir das imagens obtidas no levantamento Laser.
- 9) Sobreposição das imagens hipsométricas das diferenças entre a batimetria e o levantamento Laser (uma imagem para cada método de redução das sondagens batimétricas ao nível d'água instantâneo) e o mapa de uso solo. Análise dos dados para identificar se as diferenças de

elevações que não correspondem ao assoreamento estão relacionadas a presença de vegetação arbustiva.

10) Geração dos MDT do levantamento batimétrico, através da rede de triângulos irregulares (TIN) a partir da triangulação de Delaunay:

- a) Batimetria, sondagens batimétricas reduzidas ao nível d'água instantâneo levantados com RTK móvel (receptor/antena instalado no barco);
- b) Batimetria, sondagens batimétricas reduzidas ao nível d'água instantâneo levantados com RTK estático (receptor/antena instalado na margem do reservatório);
- c) Batimetria, sondagens batimétricas reduzidas ao nível d'água instantâneo levantados com régua linimétrica.

11) Cálculo do volume assoreado na área de estudo, através da diferença entre as superfícies geradas do levantamento batimétrico (uma MDT para cada método de redução das sondagens batimétricas ao nível d'água instantâneo) e do levantamento Laser.

12) Análise das diferenças de volume encontradas antes e após o enchimento do lago.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe uma metodologia para avaliar e monitorar o assoreamento do reservatório da Usina Hidrelétrica Mauá. Para tal foram utilizados dois métodos e épocas distintas de coleta de dados. Antes da formação do lago realizou-se um levantamento Laser e após executou-se um levantamento batimétrico.

As seções batimétricas regulares foram realizadas com equidistância de 10 m, perfazendo um total de 31 linhas, enquanto que as sondagens de verificação foram feitas com espaçamento de 50 m num total de 11 linhas, porém uma das linhas apresentou erros de leituras e foi retirada do conjunto de dados.

Realizou-se o processamento dos dados batimétricos utilizando-se três técnicas de redução de sondagens batimétricas, considerando como nível de redução o nível d'água instantâneo. E conclui-se que as observações do nível d'água feitas a partir de réguas linimétricas e com RTK estático instalado na margem do rio apresentaram resultados similares e se demonstraram eficientes para avaliar o assoreamento. As medições do nível d'água feitas pelo RTK Móvel durante a execução das linhas de sondagens regulares, quando comparados com o levantamento Laser apresentou uma diferença de volume em relação aos outros métodos de redução superior à 11 mil m<sup>3</sup>. Porém as IVT para os três métodos classificaram o levantamento batimétrico como ordem 1a com relação a resolução S-44 (profundidades superiores à 40) da OHI. Com relação ao PEC Altimétrico a redução das sondagens nos três métodos estão inseridos na classe “B”.

Os modelos digitais do terreno foram obtidos por dois métodos de interpolação: TIN através da triangulação de Delaunay, estrutura de dados vetorial; e método da Vizinhança Natural, estrutura de dados matricial. Os

modelos gerados TIN foram utilizados para calcular a diferença de volume entre as superfícies, pois este método é mais preciso em relevos com variações de declividades. O método da Vizinhança Natural foi adotado para analisar as diferenças de elevação entre as diferentes superfícies e verificar locais que as diferenças de volume não representam o assoreamento. Uma malha regular é apropriada para análise qualitativa, e a interpolação pelo Vizinho Natural tem como vantagem a suavização da superfície em regiões que não têm dados e manter a representação nos locais amostrados.

Analisando as imagens de diferenças de elevações entre o levantamento Laser e a batimetria constatou-se que em locais que haviam árvores na realização da cobertura aérea a batimetria mediu profundidades maiores que o levantamento Laser, apresentando diferenças de até 25,67m. Próximo às margens do lago, locais sem mato, as diferenças não foram superiores a 2 m. na região da enseadeira, onde tinha uma grande quantidade de material esperava-se que ocorresse uma suavização e isto realmente ocorreu após o enchimento do lago.

Conclui-se que para avaliar e quantificar o assoreamento entre dois levantamentos realizados em épocas distintas com diferentes técnicas e métodos, deve ser utilizado apenas MDT, e não o Modelo Digital de Elevação. No caso do levantamento Laser deve-se extrair a vegetação. a. Isto é, dependendo do método adotado na coleta de dados o valor que quantifica o volume assoreado pode representar inconsistências geométricas inerentes ao método ou técnica aplicada.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

- Realizar levantamento batimétrico em uma área sem cobertura vegetal, na época de realização da cobertura área com levantamento Laser;
- Ajustar superfícies de interpolação por diversos métodos de interpolação e avaliar os resultados apresentados por cada método;
- Executar levantamento batimétrico com ecobatímetro multifeixe e comparar os resultados obtidos com o ecobatímetro monofeixe.
- Realizar levantamento batimétrico com dois conjuntos de equipamentos instalados nos dois lados do barco e comparar os resultados obtidos;
- Gerar o MDT com o segundo impulso do Laser e eliminar a cobertura vegetal.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARYA, B. FAGERMAN, J. WRIGHT, C. Accuracy assessment of DTM data: a cost effective approach for a large scale digital mapping project. **IAPRS**, v. 33, Amsterdam, 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Diretrizes para elaboração de serviços de cartografia e topografia, relativos a estudos e projetos de aproveitamentos hidrelétricos**. Superintendência de Gestão e Estudos Hidroenergéticos. Brasília, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA. Resolução Conjunta nº 3, de 10 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, v.147, n. 201, p. 124, 20 out. 2010. Seção 1.

ALMEIDA, S. B.; CARVALHO, N. O. Efeitos do assoreamento de reservatórios na geração de energia elétrica: análise da UHE Mascarenhas, ES. **X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul**, Gramado, 1993.

ARTILHEIRO, F. M. F. **Fundamentos de Hidrografia**. 2006. Bombeiros. Disponível em: <[http://www.bombeiros.pt/wp-content/uploads/2013/03/Fundamentos\\_Hidrografia.pdf](http://www.bombeiros.pt/wp-content/uploads/2013/03/Fundamentos_Hidrografia.pdf)>. Acesso em: 15/03/2014.

BRASIL. Decreto-lei n.89.817, de 20 de junho de 1984. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 22 jul., 1984.



BRONSVOORT, K. **Sedimentation in reservoirs: Investigating reservoir preservation options and the possibility of implementing water Injection dredging in reservoirs**. 142p. Dissertação (Mestrado) – Section Dredging Engineering, Faculty Civil Engineering & Faculty 3ME, Delft University of Technology, Holanda, 2013.

CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, p.62-69, fev-2005.

CARVALHO, N. O. et al. **Estudos do assoreamento de grandes reservatórios: o caso de Tucuruí**. Trabalho apresentado no. 25. Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador, 2003.

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL, 132p. 2000.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CORREA JUNIOR, C. **Estudo da propagação acústica no mar na camada de mistura**. 71p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ELETROBRAS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A; IPH, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 1992. 100p.

ESRI: HELP ARCGIS. Disponível em:  
<<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/>>. Acesso em: 19/11/2014.

FELQUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G.. **Modelagem Numérica de Terreno**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 27/05/2014.

FERREIRA, I. O. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos**. 85p. Dissertação (Mestrado): Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

FIRJAN: A expansão das usinas a fio d'água e o declínio da capacidade de regularização do sistema elétrico brasileiro. 2013. Disponível em: <http://www.firjan.org.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908CEC3F86E51A014044D8D3FD2461>>. Acesso em: 23/05/2014.

GARCÍA, M. H. **Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice**. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY. 417p. 2008. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110.

HYPACK®. **Hydrographic Survey Software User Manual**. Estados Unidos da América, 2010. Manual.

JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation**. 2. ed. Cambridge: Cambridge, 2010.

KAREL, W.; PFEIFER, N.; BRIESE, C. DTM quality assessment. **ISPRS Technical II Symposium**, Viena, v. 36, 2006.

KRUEGER, C. P. Integração do GPS e da ecobatimetria. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 5, p. 55-68, 1999.

KUWAJIMA, J. I. **Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/ Brotas/ SP)**. 158p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MARINHA DO BRASIL. DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **NORMAM-25/DHN: normas de autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. 2011.

MATOS, A. J. S. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional “CAV-NH”**. 137p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MATOS, J. **Modelos Digitais de Terreno**. Lisboa, 2007. 75 slides, color. Disponível em: <[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571948538/MDT\\_v2.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571948538/MDT_v2.pdf)>. Acesso em: 27/05/2014

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005, 425 p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008, 476 p.

NAMIKAWA, L. M. et al. **Modelagem Numérica de Terreno e Aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003, 142p. e-book. Disponível em: < <http://www.inpe.br/biblioteca/>>. Acesso em: 12/12/2014.

NMEA 0183 Standard. Disponível em: <[http://www.nmea.org/content/nmea\\_standards/nmea\\_0183\\_v\\_410.asp](http://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp)>. Acesso em: 29/03/2014.

NARDEZ, N. N. **Metodologia para determinação dos afastamentos (offsets) entre sensores numa embarcação hidrográfica**. 110p. Dissertação (Mestrado): Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

OLIVEIRA, F. F. **Desenvolvimento de uma plataforma de software para Modelagem Digital de Terrenos baseada em TIN**. 143P. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

Organização Hidrográfica Internacional (OHI). **Manual de Hidrografia**. Publicação C13. Tradução. Lisboa: Instituto Hidrográfico – Portugal, 2005.

Organização Hidrográfica Internacional (OHI). **Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos**. Publicação Especial nº 44. Tradução Peter Esteves. 5. ed. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação – Brasil, 2008.

PEUCKER, T. K. et al. The Triangulated Irregular Network. In. **AUTOCARTO IV - Proceedings of the International Symposium on Cartography and Computing: Applications in Health and Environment**. American Congress on Surveying and Mapping: Virginia, 1979. v. 2. p. 94-134. e-book. Disponível em: <<http://www.mapcontext.com/autocarto/proceedings/auto-carto-4-vol-2/>>. Acesso em 17/12/2014.

RAMOS, A. M. **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso**. 227p. Dissertação (Mestrado) – Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RIBEIRO, S. R. A.; CENTENO, J. A. S.; KRUEGER, C. P. Estimativa de profundidade a partir de levantamento batimétrico e dados IKONOS II mediante redes neurais artificiais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 171-185, 2008.

SÁNCHEZ, J. A. C. **Cartografía Submarina**. Disponível em: < <http://www.soy-jacs.com/buceo/articulos/cartografiasub.pdf> >. Acesso em: 22/03/2014.

SEEBER, G., **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SILVA, R. N. F. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SILVA, S. A. **Avaliação do assoreamento do lago Bonsucesso, Jataí – GO.** 110p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SILVEIRA, A. C. **Estimação da acurácia da posição de “pixels” em sistemas de batimetria multifeixe.** 95p. Tese (Mestrado) – Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SUKUMAR, N. Natural neighbour Garlekin methods. **International Journal for numerical methods engineering**, Evanston, 2001.

TEDESCO, A. **Estimativa de profundidades utilizando imagens de alta resolução apoiadas por dados de levantamento batimétrico.** Dissertação (Mestrado) – Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

TOPCON Positioning Systems. **Hiper® Lite and Hiper® Lite+ Operator's Manual.** Estados Unidos da América, 2004. Manual.

Trimble Nagivation: Compact data Transmission standard for high-precision GPS. Disponível em: <[gpsd.googlecode.com/files/Trimble-CMR.pdf](http://gpsd.googlecode.com/files/Trimble-CMR.pdf)>. Acesso em: 02/05/2014.

TWENHOFEL, W. H. **Principles of Sedimentation.** McGraw Hill Book Company: New York, 1939.

UHE Mauá: ficha técnica. Disponível em: <<http://www.usinamaua.com.br/a-usina/ficha-tecnica>>. Acesso em 06/03/2014.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering.** ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY. 417p. 2006. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54.

VILHENA, R. M.; ROIG, H. L.; MENESES, P. R. Determinação do assoreamento de reservatório utilizando técnicas de geoprocessamento, o caso do reservatório de Funil – RJ. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2649 - 2651.

WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital Terrain Modeling. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical Information Systems: Principles and applications**. New York: Longman Scientific & Technical, 1991, v. 1, p.269 -297.

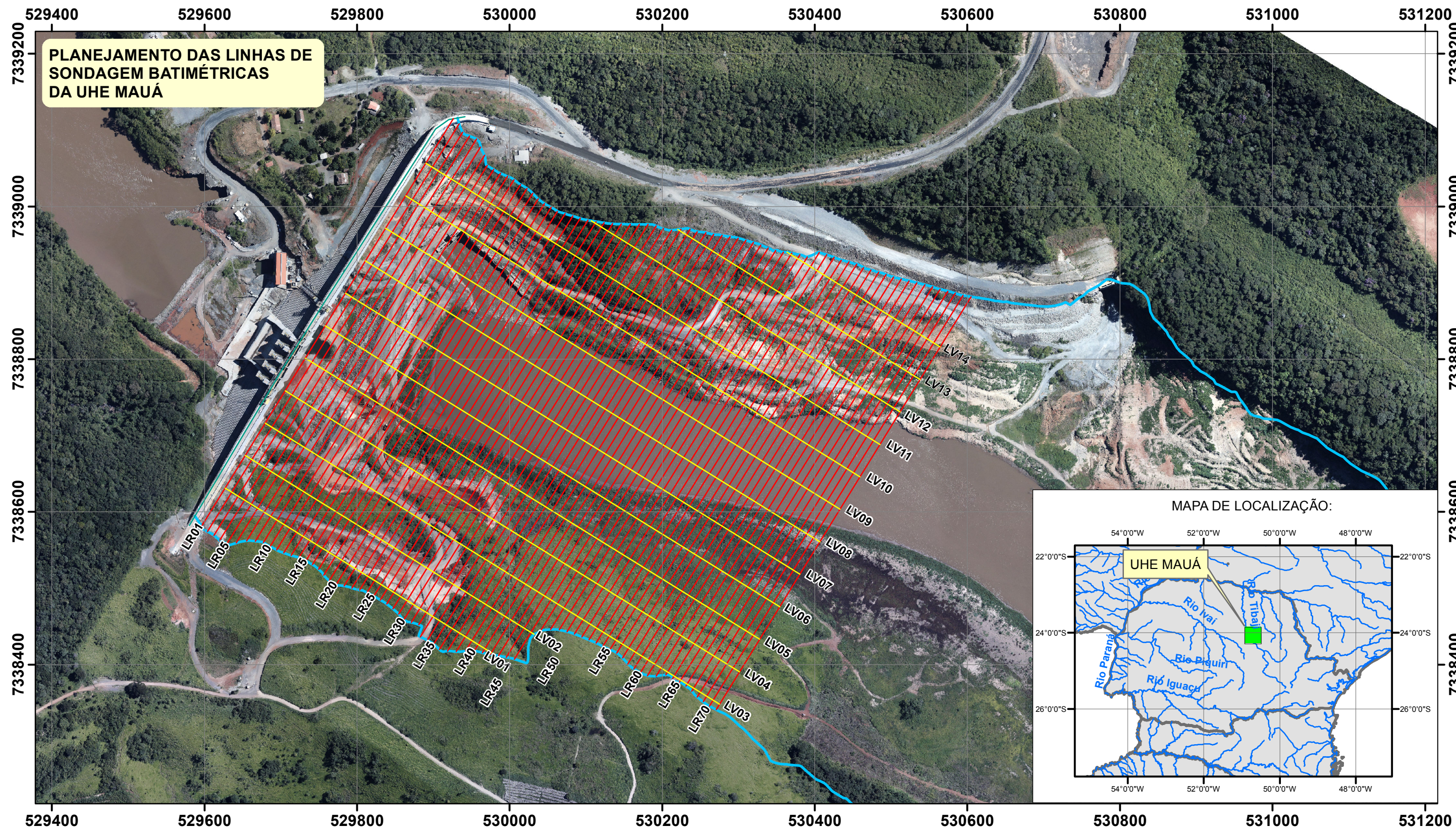
## APÊNDICES

APÊNDICE 1 - MAPA DO PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	117
APÊNDICE 2 - MAPAS DOS MODELOS TIN 2D E HIPSOMÉTRICOS INTERPOLADOS PELO MÉTODO DA VIZINHANÇA NATURAL.....	119
APÊNDICE 3 - PERFIS DAS SONDAGENS BATIMÉTRICAS .....	128

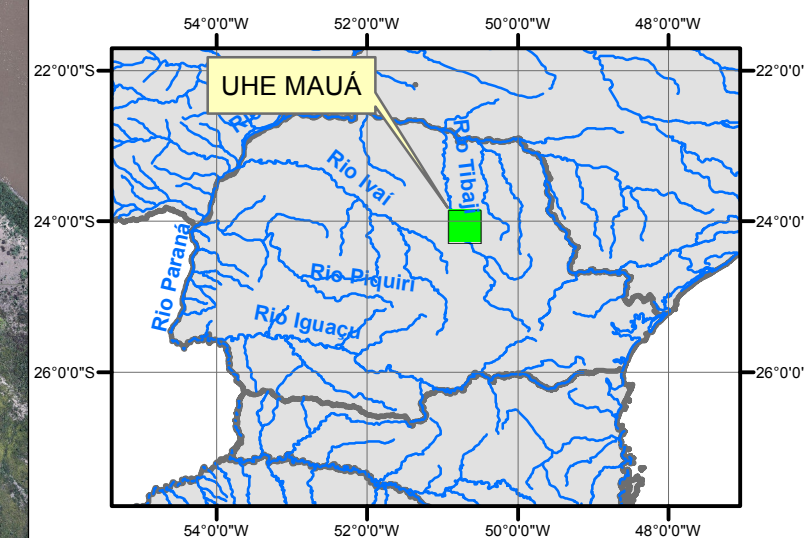
**APÊNDICE 1 - MAPA DO PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO  
BATIMÉTRICO**



PLANEJAMENTO DAS LINHAS DE  
SONDAGEM BATIMÉTRICAS  
DA UHE MAUÁ



MAPA DE LOCALIZAÇÃO:



Legenda

Sondagens Batimétrica

- Regular
- Verificação
- Reservatório

Escala 1:5.000



Informações Cartográficas

Datum Horizontal: SIRGAS 2000  
Datum Vertical: Imbituba-SC  
Projeção Cartográfica: UTM  
Fator de Escala: 0,9996  
Meridiano Central: 57° W Gr.

Equidistâncias:

- Sondagens Regulares: 10 m  
- Sondagens de Verificação: 50 m  
Velocidade Prevista Embarcação: 4 nós (2,06 m/s)  
Área Batimetria: 42,16 ha



CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS

PROJETO:

MONITORAMENTO DO ASSOREAMENTO PRÓXIMO  
AO EIXO DO RESERVATÓRIO DA UHE MAUÁ

ALUNO:

WESLEY ANDERSEN MEZINE

ORIENTADORES:

Dr. PEDRO LUIZ FAGGION  
Dr. LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

REVISÃO:

REV-01

DATA:

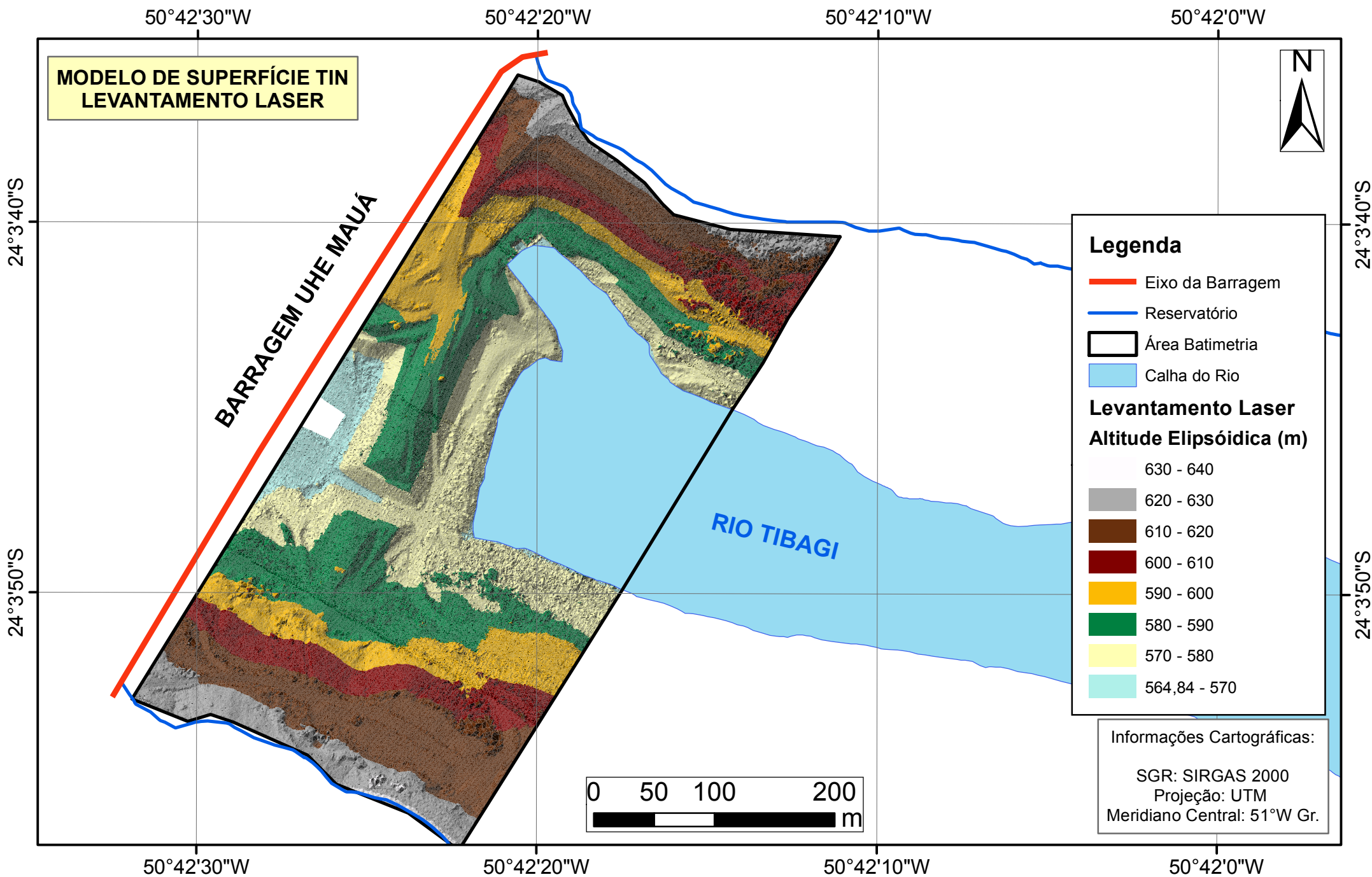
26/05/2015

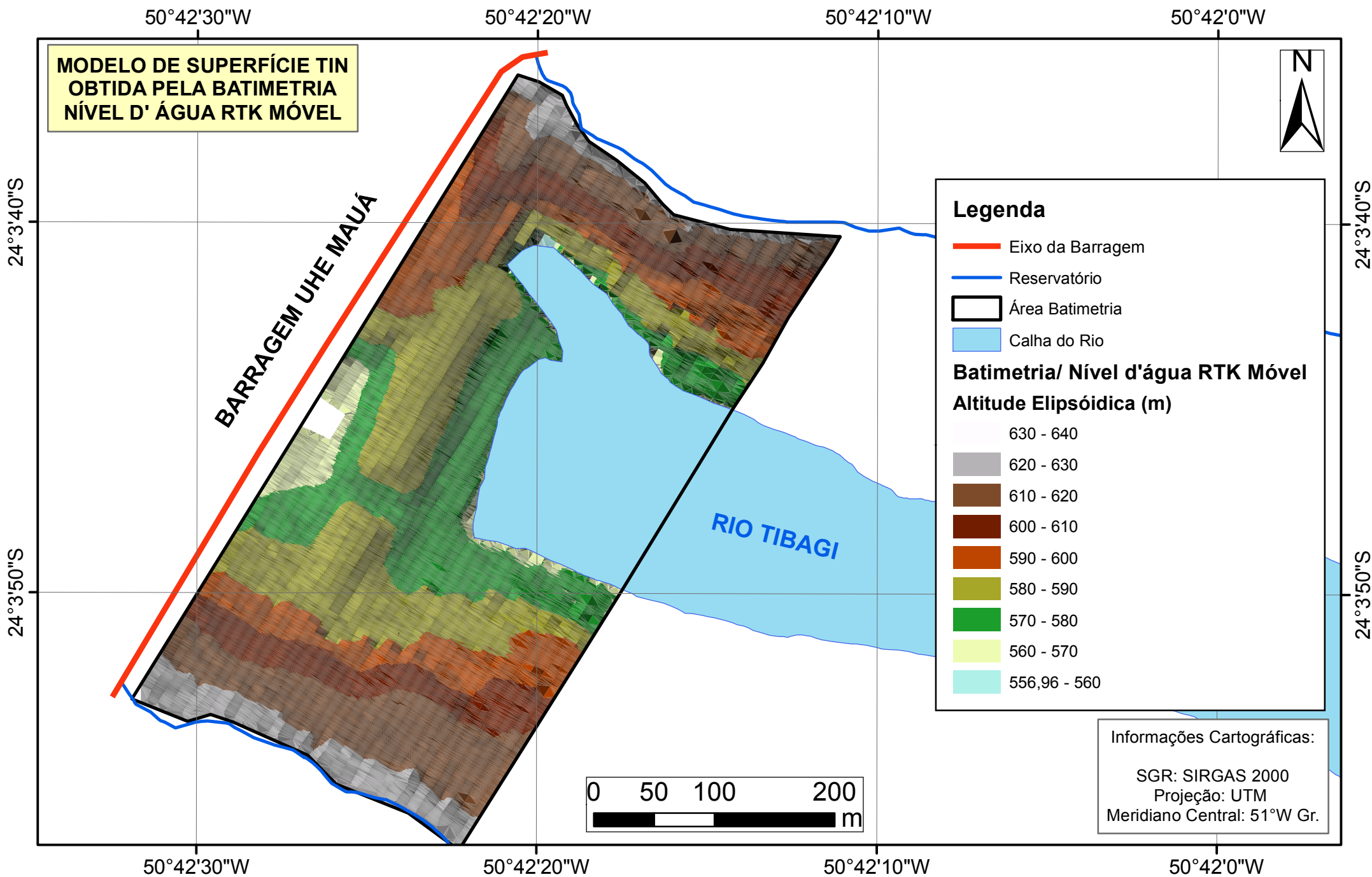
FOLHA:

1/1

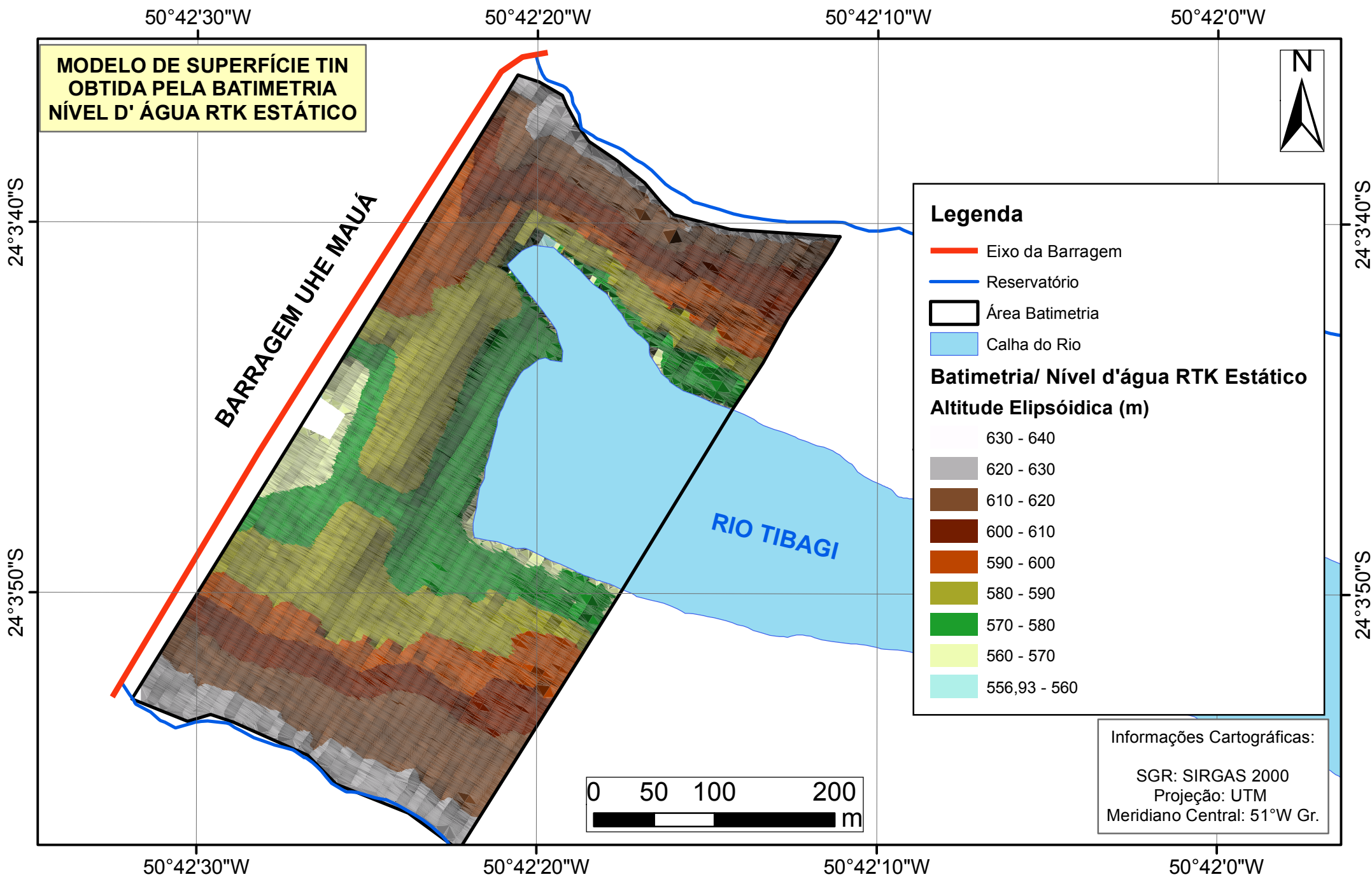


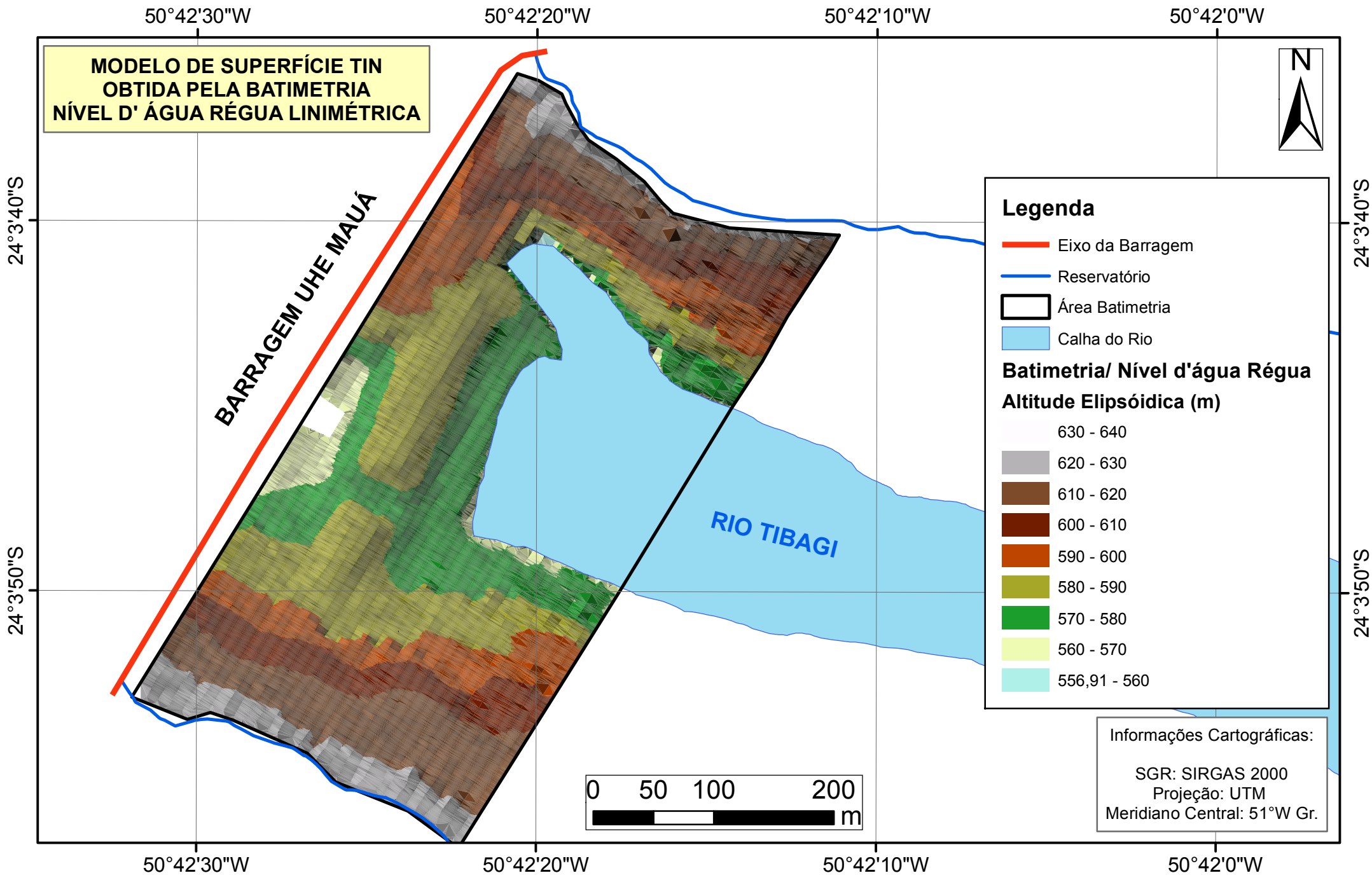
**APÊNDICE 2 - MAPAS DOS MODELOS TIN 2D E HIPSOMÉTRICOS  
INTERPOLADOS PELO MÉTODO DA VIZINHANÇA NATURAL**

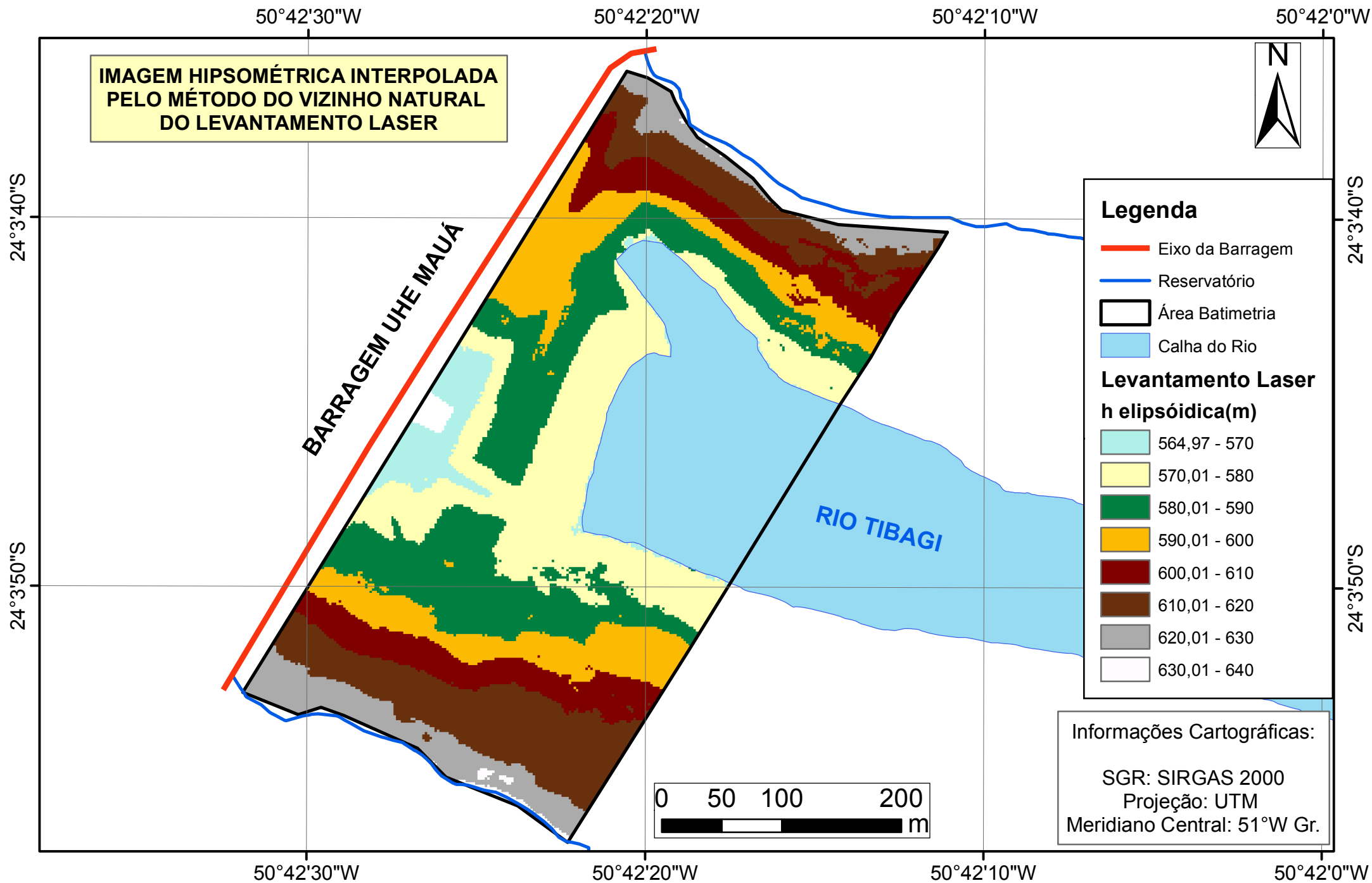


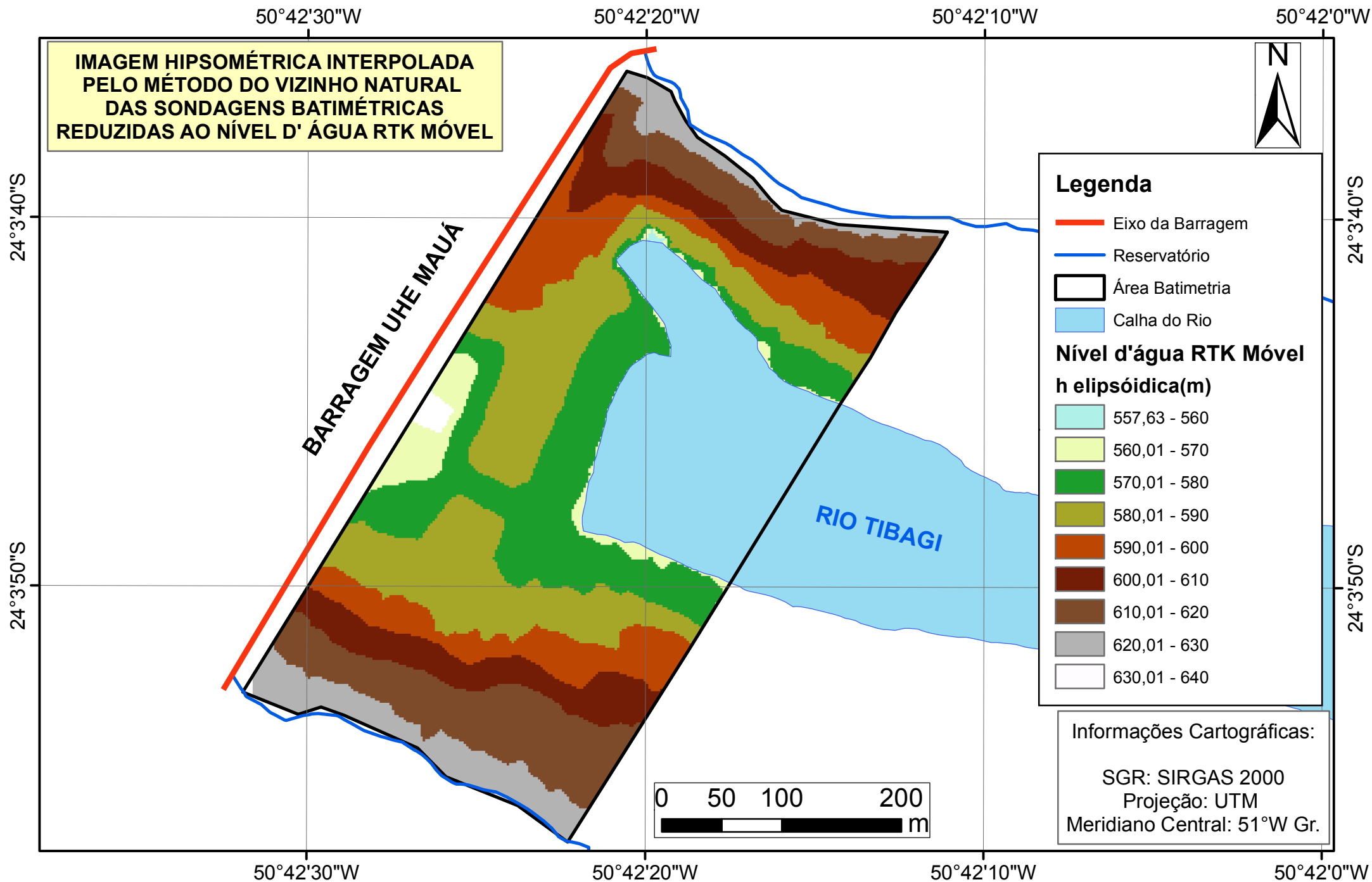




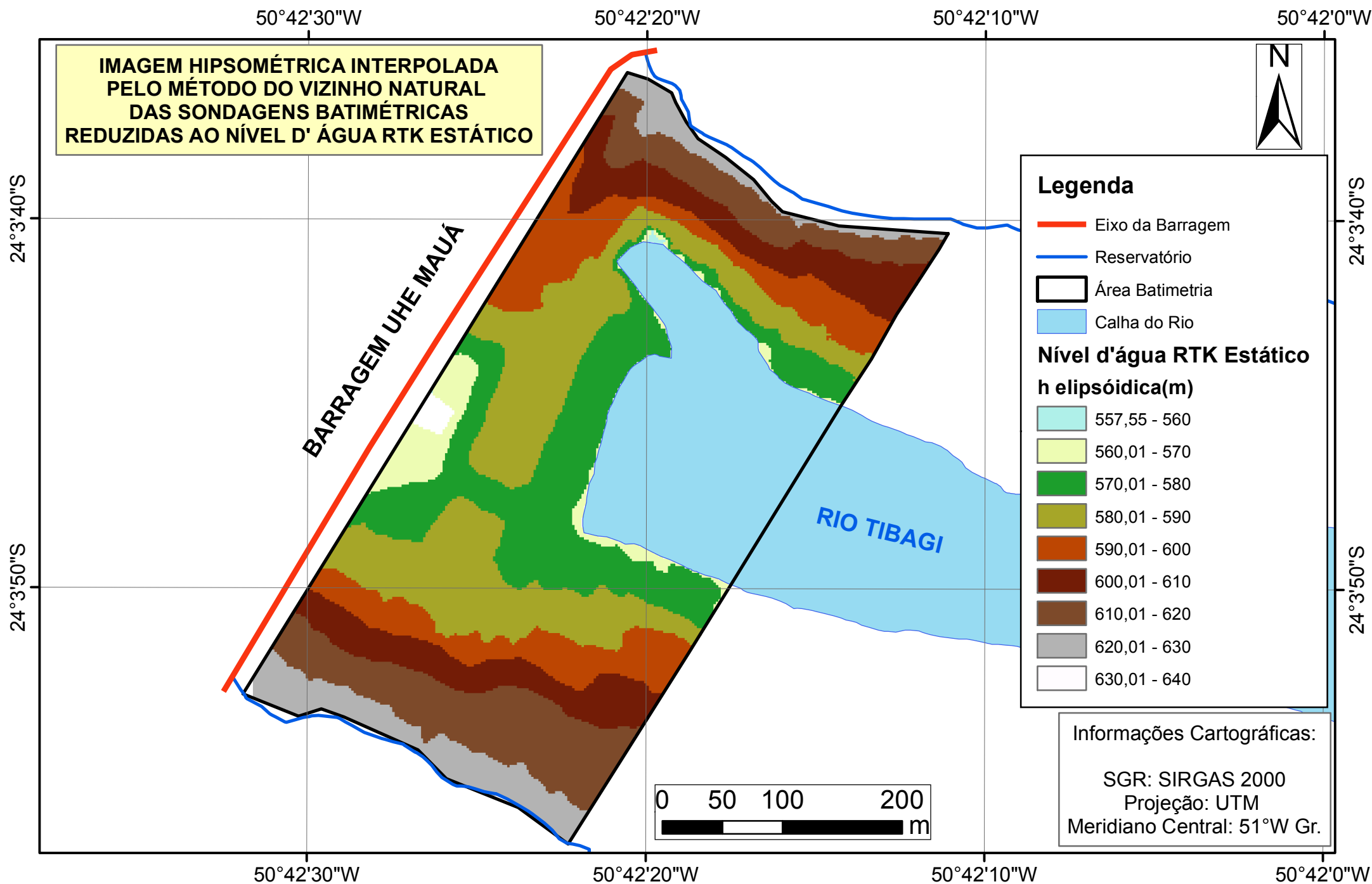


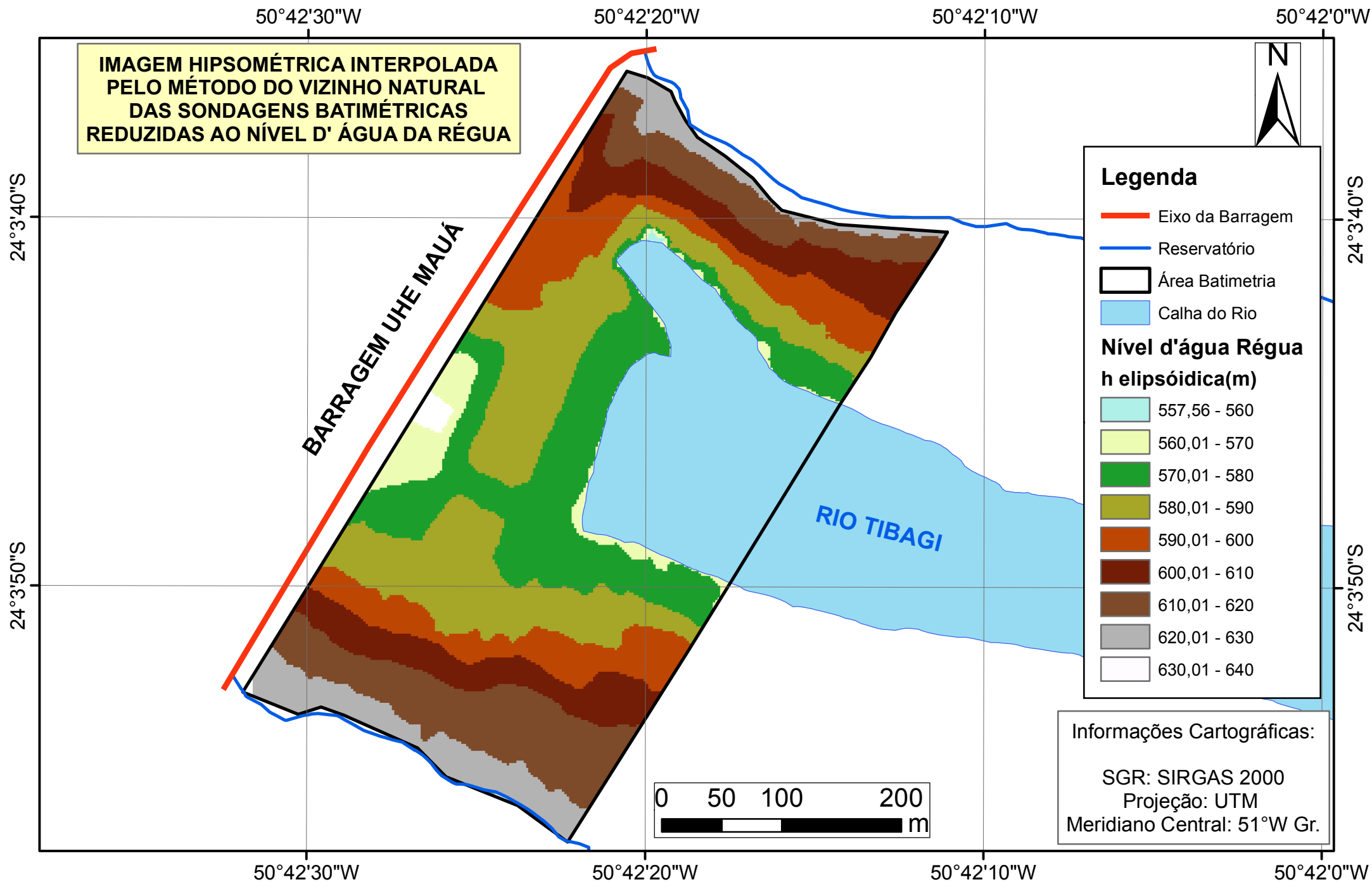












### **APÊNDICE 3 - PERFIS DAS SONDAGENS BATIMÉTRICAS**

A seguir são apresentados os perfis das sondagens batimétricas regulares e de verificação executadas em setembro de 2014. Estes gráficos representam o fundo do reservatório na época de coleta de dados.

